

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS

INFORME FINAL
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN:

**Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella,
Limón**

Código: 5402-1421-3101
Centro Funcional: 1421006

Período:
01 Enero 2014- 31 Diciembre 2015
01 Enero – 31 Diciembre 2016

Por:

Dra. Isabel Guzmán Arias
(*Investigador Principal*)
Lic. Fernando Watson Hernández
M.Sc Karolina Villagra Mendoza
M.Sc. Ricardo Casasola Ramírez

Contenido

I.	Resumen	1
	Abstract	1
II.	Introducción	2
	Objetivo General	3
	Objetivos Específicos	3
III.	Revisión Bibliográfica	3
IV.	Metodología	7
	4.1 Área de estudio	7
	4.2 Modelación en una dimensión	8
	4.2.1 Caudales Máximos	9
	4.2.2 Topografía y Modelo de Elevación	11
	4.2.3 Modelo Hidráulico	12
	4.3 Modelación en dos dimensiones	15
	4.3.1 Estudio Hidrológico	15
	4.3.2 Modelación hidráulica de la parte baja del río	20
	4.4 Transporte de sedimentos	21
	4.4.1 Modelo de Turbulencia	21
	4.4.2 Transporte de sedimentos de fondo	22
	4.4.3 Transporte de Sedimentos en suspensión	22
V.	Resultados y análisis de resultados	25
	5.1 Modelación en una dimensión	25
	5.1.1 Manchas de inundación T=17 por trayectos	26
	5.1.2 Secciones de áreas críticas y obras recomendadas	35
	5.2 Modelación en dos dimensiones	53
	5.2.1 Manchas de Inundación	53
	5.2.2 Análisis de trayectos vulnerables	58
	5.3 Transporte de sedimentos	62
	5.3.1 Transporte de materiales de arrastre y en suspensión	65
VI.	Conclusiones y recomendaciones	67
VII.	Referencias Bibliográficas	69

I. Resumen

La Vertiente Atlántica es una zona altamente vulnerable a inundaciones donde, a causa de su topografía y cambios en el uso de la tierra, se ha debilitado la capacidad de retención de agua en las cuencas y en consecuencia se ha aumentado la capacidad destructiva de las descargas extremas en los ríos. Un fenómeno que ha marcado el antes y el después en la evolución geológica y morfológica de las cuencas en esta zona es el terremoto de Limón en el año 1991, el cual llegó a modificar la dinámica tradicional y estabilidad de sus cauces. Dentro de las principales cuencas afectadas se encuentra la del Río La Estrella, principalmente en la parte baja, donde se localiza el Valle de la Estrella. En esta zona, se ha observado un aumento en la frecuencia y magnitud de los desbordamientos, una constante acumulación de sedimentos provenientes de las partes más altas y una inestabilidad en la dinámica del cauce. Esto ha aumentado la vulnerabilidad, ante los impactos por inundación y arrastre de sedimentos, tanto de sus habitantes, actividades productivas y ecosistemas que interactúan en esta área. En este proyecto se hace una evaluación de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en la parte baja del río La Estrella (desde el Valle de la Estrella hasta la desembocadura) por medio de los modelos matemáticos HEC-RAS e IBER en una y dos dimensiones, logrando un mejor entendimiento del comportamiento del río, identificando condiciones y puntos críticos de flujo y transporte de sedimentos, y simulando posibles situaciones ante escenarios basados en ocurrencia de eventos extremos útiles para una adecuada gestión de la cuenca.

Abstract

The Atlantic coast is highly vulnerable to flooding due to its topography and changes in land use. This situation has weakened the water retention capacity of its watersheds increasing the destructive capacity of the flood events. The Limón Earthquake in 1991 was the phenomenon that marked a before and after, in terms of geological and morphological evolution of the basins in this area, modifying the traditional dynamics and stability of many river channels. One of the main affected watersheds is the lower part of La Estrella River, where La Estrella Valley is located. This area has faced an increase in the frequency and magnitude of the river overflow, a constant accumulation of sediments coming from the higher parts and an instability in the channel dynamics. This has increased the vulnerability of its inhabitants, productive activities and ecosystems that interact in this area. This project models the hydrodynamics and sediment transport in the lower part of La Estrella River (from the Valley to the river mouth) by means of the mathematical models HEC-RAS and IBER in one and two dimensions. It was able to obtain a better understanding of the river behavior, by identifying conditions and critical flow and sediment points. Different flow scenarios were also able to be simulated based on the occurrence of extreme events useful for a proper basin management.

II. Introducción

La frecuencia y magnitud de los desbordamientos de los ríos en la Vertiente Atlántica es una realidad que conlleva efectos sobre los cauces y las áreas más cercanas a estos, como: una permanente erosión de los márgenes, una continua deposición o almacenamiento de sedimentos, y obstrucción o restricción del cauce. Estos efectos no sólo se deben a la inestabilidad del cauce, sino también a la ausencia de estudios y diseños adecuados de las estructuras de protección y control y la falta de mantenimiento de infraestructura conocida. La problemática de la cuenca se explica desde cuatro dimensiones: cobertura, morfología, inundaciones y biodiversidad marina. Desde el punto de vista de la cobertura, esta cuenca presentaba, antes del terremoto de 1991, una estabilidad relativa en la parte superior y media. Los deslizamientos provocados por el sismo generaron un desequilibrio debido a la pérdida de cobertura en las partes altas de la cuenca y una consecuente sedimentación natural. Esto afectó no sólo el ambiente natural de las montañas sino también la cantidad de sedimentos transportados por el río principal y sus afluentes. La acumulación de sedimentos en los ríos ha provocado una pérdida importante en la capacidad hidráulica de los mismos, ocasionando frecuentes desbordamientos. El análisis de la dinámica de las inundaciones y su frecuencia han identificado que antes del sismo las inundaciones tenían una magnitud importante ($700-900 \text{ m}^3/\text{s}$) entre 5-6 a 9-10 años de períodos de retorno, contrario a la situación actual donde los eventos extraordinarios se presentan cada año o cada dos años (desde 1200 hasta $3496 \text{ m}^3/\text{s}$), inclusive se han presentado dos a tres eventos extraordinarios durante un mismo año. Esto no sólo ha provocado pérdidas económicas para los pobladores que viven al margen de los ríos, sino también ha impactado directamente las actividades productivas de la región (Bruce y Casasola 2005). Desde una dimensión morfológica la cuenca presenta un estrangulamiento natural a la altura del poblado de Pandora, incrementando las inundaciones aguas arriba. Esto debido a que a lo largo del valle el cauce mantiene un mayor dimensionamiento hidráulico y cuenta con un área extensa para su movimiento (varios kilómetros). Lo contrario se observa aguas abajo del “embudo” donde el río se mueve por una zona montañosa estrecha de aproximadamente 200 metros de ancho. Conforme la corriente del río La Estrella se acerca a este embudo natural, la velocidad del flujo disminuye a tal punto que se produce una abundante deposición de sedimentos finos especialmente limos y arcillas. En este mismo sector se ha observado, cómo luego de las inundaciones el río inicia un proceso de auto-limpieza de sus riveras y fondo. Consecuentemente, el aumento de sedimentos que llega al mar ha deteriorado los arrecifes de coral al obstruir los procesos fotosintéticos. Entre los arrecifes más afectados se encuentra el del Parque Nacional Cahuita reflejado en una baja de crecimiento y aumento de mortalidad de éstos (Mora y Chavarría 2008). Situación contraria ocurre aguas arriba del puente de Atalanta, donde el río no logra remover, una vez pasada la avenida (ola de inundación), los materiales que llegan de las partes altas durante las inundaciones. Esta situación va provocando una significativa disminución de la sección hidráulica, aumentando la vulnerabilidad de los asentamientos y actividades productivas que se encuentran a lo largo de los márgenes del río.

Debido a esto es urgente entender la dinámica actual del río La Estrella con el fin de generar una herramienta confiable de prevención y diseño, capaz de contribuir en la toma de decisiones en la prevención de desastres que puedan potencializar el costo humano y productivo y además mejorar el cálculo de parámetros hidráulicos para el diseño de obras de protección y de infraestructura (diques, puentes, protección de márgenes, etc).

En la Escuela de Ingeniería Agrícola se ha propuesto, por medio de este proyecto, evaluar la hidrodinámica y transporte de sedimentos en la parte baja del río La Estrella (desde el Valle de la Estrella hasta la desembocadura) por medio de los modelos matemáticos HEC-RAS e IBER en una y dos dimensiones, respectivamente. Además, se han establecidos convenios con instituciones públicas como Corporación Bananera Nacional (CORBANA) y Comisión Nacional de Atención de Riesgo y Prevención de Desastres (CNE), en coordinación con otras instituciones como Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA), Dirección de Agua del MINAE y empresa privada, quienes tienen la responsabilidad de ejecutar obras de protección y que han mostrado un interés en que la academia se involucre en aportar fundamentos científicamente válidos para una adecuada gestión de la cuenca y la adecuada toma de decisiones en el diseño y construcción de obras de protección, beneficiando a productores, centros de población de la zona, infraestructura vial y ecosistemas relacionados.

Con la conclusión del proyecto de modelación del río La Estrella, el grupo de investigadores continuará los estudios en los ríos Matina, Banano y Bananito, siguiendo la ruta de investigación establecida y colaborando con la atención de inundaciones en la Vertiente Atlántica por parte de la CNE. Cabe resaltar que existe actualmente un decreto de emergencia que exige la atención a los puntos más vulnerables según el reporte de las últimas inundaciones registradas.

Objetivo General

1. Entender el comportamiento presente del Río La Estrella por medio del modelado hidrodinámico y de transporte de sedimentos.

Objetivos Específicos

1. Evaluar el régimen de flujo del río La Estrella.
2. Evaluar el transporte de sedimentos en suspensión y de arrastre.
3. Validar el modelo en 1D y 2D para las condiciones de flujo de Costa Rica.
4. Evaluar el aumento del riesgo de inundación.

III. Revisión Bibliográfica

Inicialmente se creía que las inundaciones se debían a la formación de la escorrentía en la cuenca, pero con el tiempo se ha entendido que otros procesos también contribuyen a su formación, como por ejemplo: procesos en el régimen de flujo de los cauces y subterráneos en la cuenca. Estimulado por un aumento, a nivel mundial, en la ocurrencia de descargas extremas, múltiples investigaciones se han intensificado con el fin de mejorar el

entendimiento sobre el fenómeno de inundación. De esta manera, se han analizado los procesos físicos que contribuyen a la generación de las inundaciones, se han desarrollado nuevos métodos matemáticos y se han creado nuevos conceptos de gestión.

La gestión de inundaciones se considera un proceso complejo donde interactúan aspectos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, ambientales, económicos y sociales. Utiliza además, un sistema para la toma de decisiones basado, principalmente, en herramientas de modelado debido a la complejidad que envuelve el manejo de las inundaciones. Se manejan modelos de acceso remoto, para sistemas de información geográfica, para simulaciones (hidrológicas, hidráulicas, meteorológicas, etc), para el análisis de riesgo y de políticas, entre otros (Ahmad y Simonovic 2006).

Desde el punto de vista del modelado del recurso hídrico, estos modelos son utilizados como herramientas para el planeamiento y diseño de infraestructuras, así como para realizar pronósticos con el objetivo de implementar medidas de mitigación. A esto se le suma el modelado de transporte de sedimentos en cauces, el cual ha tomado relevancia en las últimas décadas debido, entre otros, al inadecuado uso que se le ha dado al suelo y a la deforestación reflejado en una disminución o ausencia de técnicas conservacionista de suelos, lo cual ha promovido la erosión hídrica del suelo y consecuentemente un aporte importante de sedimentos en los cauces, incrementando la vulnerabilidad de ecosistemas y pueblos cercanos a los ríos.

Para entender la dinámica y comportamiento del cauce en diferentes condiciones se utilizan técnicas de modelado con el fin de predecir situaciones de flujo y contribuir a la toma de decisiones para el manejo de la cuenca.

En la hidrodinámica del flujo existen modelos que pueden ser uni- o bidimensionales. En 1D se calcula de una manera simple y media el nivel del agua en un canal abierto. Este método condensa una situación de flujo complicada (la cual es tridimensional) en un simple problema unidimensional, donde se asume que la sección transversal y la velocidad del fluido a una determinada profundidad son constantes (DAAD 2006). Al ser unidimensional los parámetros son promediados a lo largo de la profundidad y sección transversal por lo que los resultados que se obtienen son valores promedios. Las ecuaciones que describen el movimiento en una dimensión del fluido son por lo general, la conservación de la masa y la energía y la segunda Ley de Newton (movimiento) (Jovanovic et.al. 2006). Así modelos en 1D proporcionan una idea generalizada, en el corto y mediano plazo, de la situación del río ante una descarga (Q) lo cual sirve, por ejemplo, para establecer zonas de inundación.

Por otro lado, modelos en 2D describen el movimiento espacial del flujo (espacio) junto con los patrones de movimiento (tiempo). Asume una distribución logarítmica de la velocidad (lo cual no es posible en 1D) y permite procesos o interacciones complejas en los cauces. Esto permite realizar simulaciones más exhaustivas acerca del impacto de estructuras para determinar el riesgo de inundación en áreas cercanas a los ríos (DAAD 2006). Las ecuaciones que resuelven problemas en dos dimensiones son por lo general: 1) ecuaciones

de Navier-Stokes (Crossley 1999, NOAA 2013), derivadas de la segunda ley de Newton (movimiento) donde la aceleración depende de la fuerza ejercida y proporcional a su masa (NOAA 2013), y 2) las ecuaciones de “aguas poco profundas” (Shallow water equations) conocidas también como ecuaciones de Saint Venant (Castro Díaz et.al. 2008, Crossley 1999) las cuales corresponden a una simplificación de las de Navier-Stokes, donde el principio se basa en que la dimensión horizontal es mucho mayor que la vertical, lo cual asume que la longitud y el ancho del canal son mucho más grandes que la profundidad. Así el movimiento en el canal va a estar sujeto predominantemente a las fuerzas horizontales (NOAA 2013). La Figura 3 ejemplifica los pasos a seguir para implementación de un modelo en una dimensión.

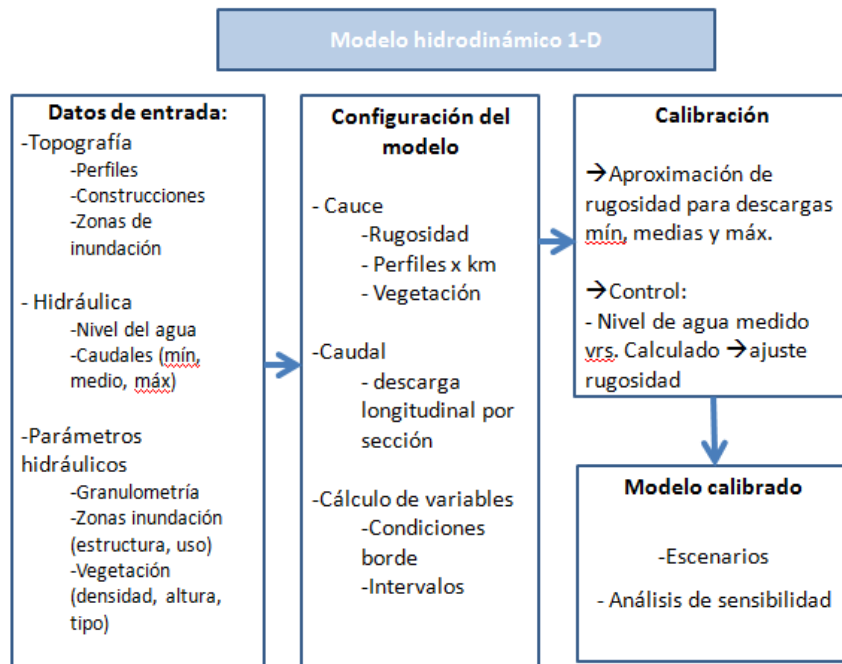


Figura 3. Pasos de un modelo hidrodinámico en 1D (Fuente DAAD 2006)

El estudio de la morfodinámica de un río se centra en el transporte de sedimentos en un canal. El transporte de sedimentos se divide usualmente en tres formas: desprendimiento del fondo, saltación y suspensión. El desprendimiento del fondo se refiere al movimiento de las partículas ya sea por arrastre o al rodar a lo largo del fondo del canal. Saltación es cuando las partículas saltan sobre el fondo una distancia proporcional a su diámetro. Y la suspensión es cuando el flujo es lo suficientemente intenso que las partículas se mueven sobre el fondo perdiendo contacto con éste. En la literatura existen diversos modelos para el transporte de sedimentos obtenidos en su mayoría de forma empírica: Meyer-Peter & Mueller, van Rijn, Nielsen, Kalinske, Einstein, donde el movimiento de los sedimentos está controlado por un parámetro físico llamado tensión cortante crítica (critical shear stress) (Castro Díaz et.al. 2008). La modelación de sedimentos es importante para estudiar los cambios morfológicos en ríos; la erosión, transporte y deposición de sedimentos contaminados; para optimizar el dragado de ríos; en la gestión de sedimentos en embalses

y zonas de inundación; y para la restauración del río a través de un diseño óptimo de las obras a realizar en él. (DHI 2004)

La combinación del componente hidrodinámico y morfodinámico permiten la creación de un sistema dual, en el cual se puede modelar con mayor precisión variables importantes, por ejemplo: profundidad del flujo, descarga del flujo y grosor de la capa de sedimentos (Castro Díaz et.al. 2008), para describir la cuenca:

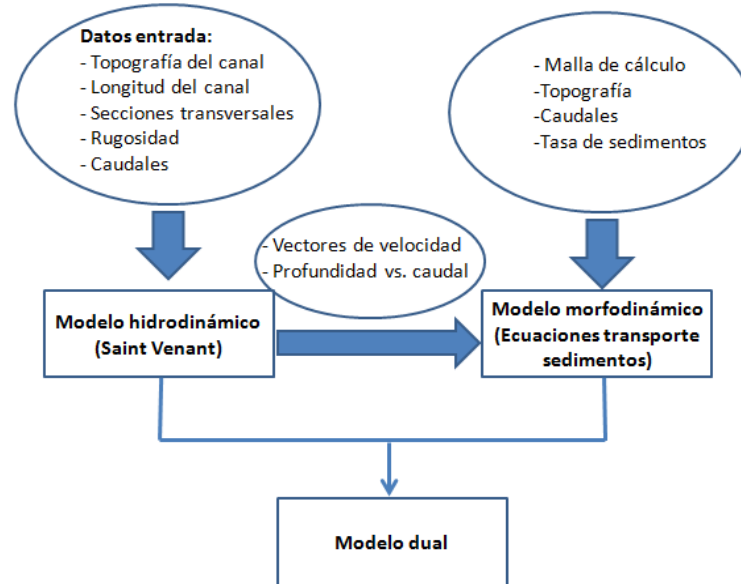


Figura 4. Modelo dual: hidrodinámico y de transporte de sedimentos

Existe una amplia gama de software que modelan la hidrodinámica de ríos en 1-D y 2-D, y algunos también incluyen un módulo para el cálculo de transporte de sedimentos, entre ellos se encuentran HEC-RAS (USACE 2010), TUFLOW (BMT-WBM 2007), MIKE-11 (DHI 2004), KALYPSO 1D y 2D (BCE 2013), Telemac-Mascaret (Artelia et.al. 2013), CCHE1D, CCHE2D, (NCCHE 2013), IBER (FLUMEN 2016) entre otros. Para este proyecto se dispuso de las herramientas de software HEC-RAS e IBER.

El HEC-RAS es un software que se utiliza para el análisis hidráulico y de sedimentos (USACE 2010). Calcula niveles de agua para cada sección de estudio, descargas, y condiciones de borde (Ahmad y Simonovic 2006). Ha sido frecuentemente validado y ha demostrado sostenibilidad y plausibilidad en los resultados (Colorado State University 2005, Segura y Casasola 2012, Gee y Brunner 2005, Saleh et.al. 2013, Tate 2004, Kelly et.al. 2007, Horrit y Bates 2002). Además, ha sido evaluado con otros modelos numéricos donde se ha desempeñado adecuadamente y ha demostrado ser capaz de brindar simulaciones consistentes (Fleenor y Jensen 2003, NWS 2007). Al ser un modelo unidimensional presenta la desventaja de no tomar todos los efectos hidrodinámicos de una avenida, por lo que carece de complejidad en el análisis de inundaciones.

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales, también conocidas como ecuaciones de St.Venant 2D. Dichas ecuaciones asumen las hipótesis de distribución de presión hidrostática y distribución uniforme de velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios y zonas costeras. La hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple de forma habitual en ríos y estuarios, siempre y cuando no existan procesos relevantes de estratificación debido a diferencias de salinidad, de temperatura o al viento. En el módulo de transporte de sedimentos se resuelven las ecuaciones de transporte por carga de fondo y por carga en suspensión. Teniendo en cuenta ambos modos de transporte se calcula la evolución de la cota del fondo debido a procesos de sedimentación y erosión mediante la ecuación de Exner. En la versión actual únicamente se consideran granulometrías uniformes. En versiones posteriores se incorporarán formulaciones específicas para mezclas de sedimento.

Desde hace algunos años también en Costa Rica han existido iniciativas para estudiar el comportamiento hidráulico y dinámico de los ríos en Costa Rica, sin embargo, estudios en transporte de sedimentos han sido muy reducidos. Dentro de las principales limitaciones a las que se han enfrentado dichos estudios ha sido la obtención de los datos los cuales son muy escasos. Solís et.al. (1993) modelaron con HEC-1 (hidrológico) y HEC-2 (hidráulico) los ríos Purirres y Turrialba, por primera vez en Centroamérica, con el fin de implementar obras de control de inundaciones, y no solo para la planificación (como se venía haciendo hasta el momento). Saborío (1996) realizó una modelación y calibración de las dimensiones hidráulicas y de transporte de sedimentos en el río Pacuare, con el modelo HEC6 y reportó problemas en recolección de datos en la cuenca. Segura y Casasola (2012) realizaron una modelación hidráulica en la parte baja del río La Estrella para estudiar el efecto de un fenómeno natural en el cauce del río y su impacto en la frecuencia de desbordamientos después de dicho fenómeno, para el estudio contaron con una buena cantidad de datos de flujo, pero con ausencia de datos de concentración de sedimentos.

IV. Metodología

4.1 Área de estudio

La cuenca del río La Estrella tiene una extensión cercana a los 704 Km², distribuidos en 12 sub cuencas hidrográficas y 3 áreas de drenaje disperso. Se localiza entre las coordenadas geográficas 9°35' – 9°50' de latitud norte y 82°50' – 83°20' de longitud Oeste. Hacia el Norte

limita con la Fila Matama, sobresalen las estribaciones Sikorbeta, Bekotumbeta, Carbón, Tigre y como principales tributarios se pueden citar al Suruy, Ley y el Niñey; al Sur limita con el Cerro Bobocara, Fila Suribeta y la Fila Carbón, los tributarios son el Abuy, Cerere, Seille, Duruy y el Bitey. El Valle La Estrella se ubica en la parte inferior de la cuenca con un área de aproximadamente 55 km², superficie que representa un 7.8 % del total de la cuenca (Figura 1) (Segura y Casasola 2012).

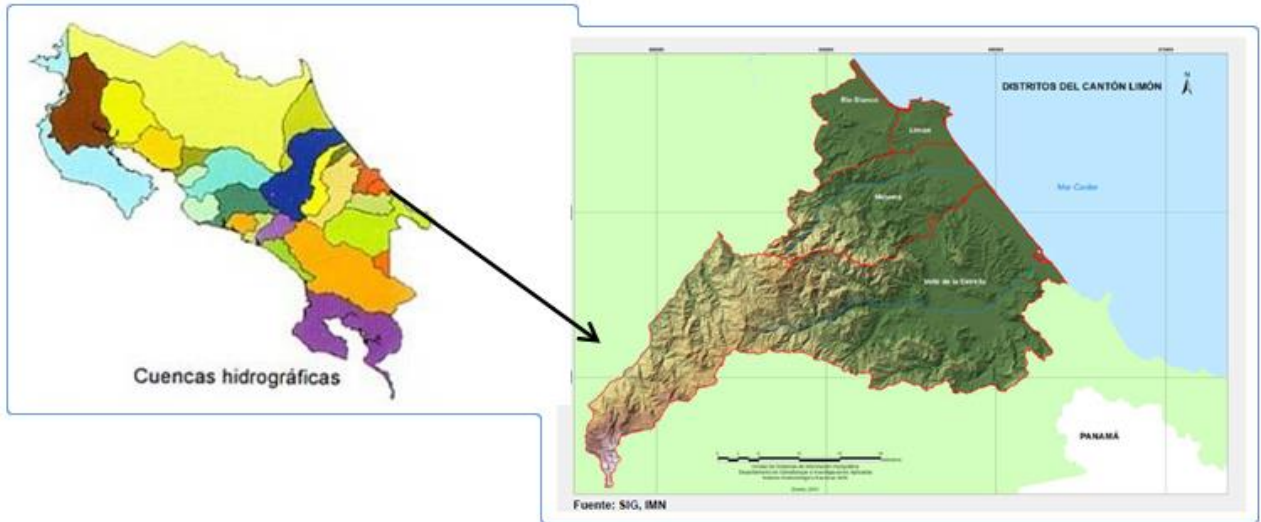


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Río La Estrella, Cantón de Limón (Fuente IGN 2011)

4.2 Modelación en una dimensión

Se realizó una modelación hidráulica del Río La Estrella en un trayecto de aproximadamente 31 km (desde la desembocadura hasta el puente de Vesta) incluyendo los afluentes Abuy, Cerere, Suruy y Niñey (Figura 2).

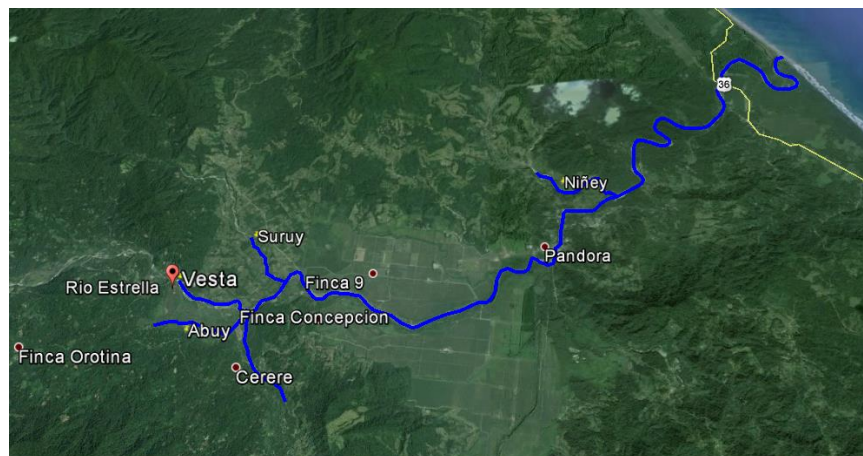


Figura 2. Ruta de modelación del Río La Estrella y sus afluentes

4.2.1 Caudales Máximos

Debido a que en la cuenca no se cuenta con una red de estaciones meteorológicas suficiente para realizar la hidrología de la cuenca, se procedió a determinar los caudales máximos a partir de registros de caudales históricos medidos con un limnógrafo del ICE, a partir de 1991, ubicado en el puente de Pandora (Cuadro 1), los caudales que superaron la marca máxima del limnógrafo fueron calculados mediante un hidrograma sintético elaborado por ingenieros de la Standard Fruit Co. Costa Rica.

Cuadro 1. Registro de caudales máximos instantáneos registrados en el Río La Estrella

Año	Caudal (m ³ /s)	Año	Caudal (m ³ /s)
1991	1530	2001	1150
1992	750	2002	3496
1993	1480	2003	950
1994	754	2004	1184
1995	-	2005	2515
1996	1700	2006	1064
1997	1150	2007	
1998	553	2008	1750
1999	1130	2009	-
2000	1200	2010	-

Fuente: Standard Fruit Co. CR

Para obtener los valores de caudales máximos se utilizó la fórmula de Weibull:

$$T = \frac{n+1}{m} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

T: periodo de retorno.

n: número de años

m: número de orden.

El Cuadro 2, muestra los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 1.1 hasta 17 años, ya que el registro de caudales históricos llega hasta 16 años.

Cuadro 2. Periodos de retorno calculados

Año	Caudal (m ³ /s)	M	T (años)
2002	3496	1	17.0
2005	2515	2	8.5
2008	1750	3	5.7
1996	1700	4	4.3
1991	1530	5	3.4
1993	1480	6	2.8
2000	1200	7	2.4
2004	1184	8	2.1
1997	1150	9	1.9
2001	1150	10	1.7
1999	1130	11	1.5
2006	1064	12	1.4
2003	950	13	1.3
1994	754	14	1.2
1992	750	15	1.1
1998	553	16	1.1

Dada la escasa información hidrológica de la cuenca del Río La Estrella, especialmente de precipitación, en el presente estudio se utilizaron como base hidrológica los caudales máximos instantáneos registrados en la Estación Hidrométrica del ICE ubicada en el puente de Pandora.

La estación cuenta con un registro de datos de 16 años, que contemplan las crecidas de 1991 y 1992. A estos datos se le aplicó el método estadístico de Gumbel, obteniendo valores para periodos de retorno de 1, 5, 10 y 17 años.

Cuadro 3. Caudal calculado con Método de Gumbel

Tr	Caudal (m ³ /s)	Unitario (m ³ /s/km ²)
1	1843.49	2.900
5	2992.91	4.708
10	3487.94	5.487
17	3496.00	5.499

Con la finalidad de lograr una modelación adecuada del comportamiento del Río La Estrella contemplando los caudales aportados por los afluentes, se realizó una correlación entre el área y el caudal. Esto permitió obtener caudales para los periodos de retorno antes indicados para cada una de las cuencas de los principales afluentes: Río Abuy, Río Cerere, Río Suruy, Río Ley, Río Bitey, Río Duruy y Río Ñiñey.

Cuadro 4. Caudales aportados por afluente según el área de drenaje de cada uno.

Nombre	Área (km ²)	Caudal (m ³ /s)			
		Tr=1	Tr=5	Tr=10	Tr=17
Estrella Alta	311.925	904.560	1468.555	1711.455	1715.410
Abuy	30.473	88.368	143.466	167.195	167.582
Cerere	82.843	240.239	390.029	454.540	455.591
Suruy	32.705	94.842	153.977	179.445	179.859
Ley	44.591	129.310	209.935	244.658	245.224
Duruy	91.567	265.539	431.103	502.407	503.568
Bitey	41.598	120.632	195.846	228.239	228.766
Ñiñey	45.493	131.928	214.185	249.611	250.188
Estrella Costa	39.728	115.208	187.041	217.977	218.481
	Total	2090.626	3394.135	3955.528	3964.669

4.2.2 Topografía y Modelo de Elevación

Para la modelación hidráulica del Río La Estrella se utilizaron los datos de topografía: secciones transversales del cauce principal y sus afluentes, batimetría cada medio metro, curvas de nivel del cauce principal y sus afluentes. La empresa CORBANA facilitó la información topográfica desde la desembocadura hasta el puente de Pandora y desde Finca 9 hasta el puente de Vesta. La empresa Standard Fruit Co, Costa Rica suministró la topografía desde el puente de Pandora hasta Finca 9.

Con la información de curvas de nivel a 1 metro del Atlas Digital 2008, y la topografía suministrada, por ambas empresas, se generó el mapa de elevación digital (DEM) de la cuenca del Río La Estrella (Figura 3). La precisión del modelo se vio reducida ya que existe un trayecto largo entre el puente de Atalanta y el puente de Pandora donde hay poca información detallada de las secciones transversales y las curvas de nivel no tienen la resolución suficiente para detallar el cauce del río. Para solventar esta situación, en la modelación hidráulica se generaron secciones interpoladas para poder utilizar un número mayor de secciones transversales. Para la generación del TIN se utilizaron coordenadas en CRTM05 en el sistema WGS-84.

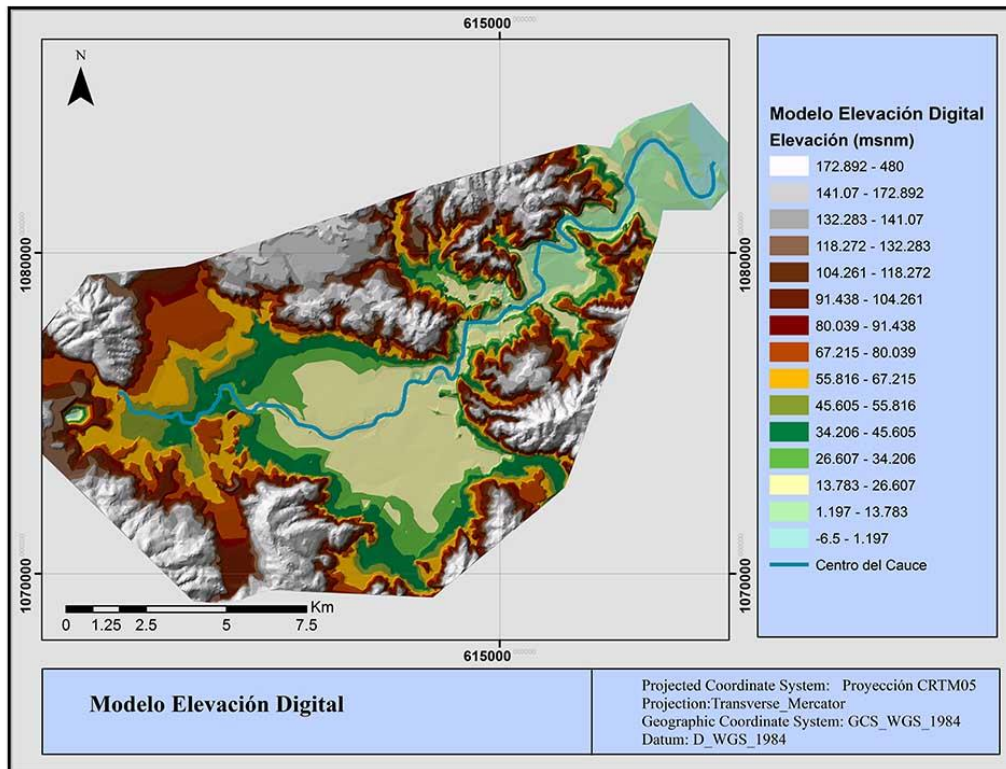


Figura 3. Elevación digital de la cuenca del Río La Estrella

4.2.3 Modelo Hidráulico

Para la modelación hidráulica se utilizó el software HEC-RAS 4.1. en una dimensión 1-D, bajo el régimen de flujo no variado, mixto (trayectos con flujo supercrítico y subcrítico) y simulando eventos máximos de caudales instantáneos. La modelación hidráulica del Río La Estrella se realizó en forma continua desde el puente de Vesta hasta la desembocadura. En las secciones en las cuales se producía desbordamiento, estas fueron extendidas con información cartográfica de curvas de nivel de 1 metro.

- Geometría

La configuración de la geometría del proyecto se elaboró, a partir de la conceptualización del sistema, donde se esquematizó, en la Figura 4, la conexión de los diferentes afluentes con los trayectos del cauce principal:

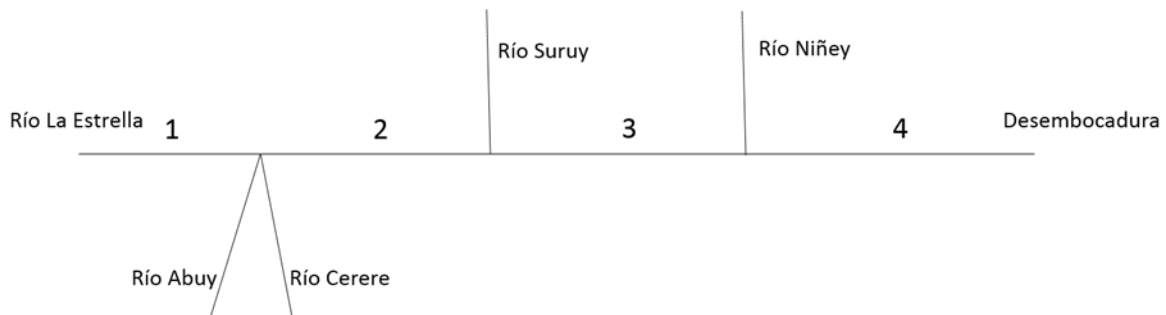


Figura 4. Diagrama de trayectos de estudio del río La Estrella.

La modelación hidráulica del Río La Estrella, está compuesta por una corriente principal y cuatro afluentes. La corriente principal del Río La Estrella se subdividió en cuatro trayectos los cuales corresponden a los trayectos formados entre inicio del levantamiento topográfico (aguas arriba), afluentes y desembocadura. El Cuadro 5, enumera los trayectos conformados para el cauce principal y sus afluentes, así como el números de secciones transversales (incluyendo secciones interpoladas) que conforman cada trayecto y la longitud del mismo. La geometría de la modelación se encuentra georreferenciada en proyección CRTM05.

Cuadro 5. Conformación de trayectos del modelo hidráulico

Río	Trayecto	Número de secciones transversales	Longitud del trayecto (m)
Estrella	1	21	2872
Estrella	2	5	1423
Estrella	3	69	13447
Estrella	4	81	13589
Abuy	1	11	1525
Cerere	1	13	1809
Suruy	1	11	1633
Niñey	1	16	3649

Para el cauce principal se diferenciaron cuatro rugosidades (n-manning) basadas en la vegetación existente, irregularidades del cauce, obstrucciones, tamaño y forma del cauce, material en suspensión y de fondo. El coeficiente de rugosidad se basó en los lineamientos facilitados por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos incluidos en el Manual de Uso de HEC-RAS 4.1. El Cuadro 6, explica los criterios utilizados en la selección de los coeficientes de rugosidad en cada uno de los trayectos del río. El anexo 1 detalla los coeficientes de rugosidad, para bancos y cauce principal, por sección. Bajo estos mismos criterios se definieron los coeficientes de rugosidad para los afluentes.

Cuadro 6. Valores de coeficiente de rugosidad (n) utilizados para la modelación hidráulica

Trayecto	n	Descripción
1	0.03 0.035	Tramo con piedras grandes, empozamientos y bifurcaciones, bancos empastados, diámetros de roca hasta de 1 metro
2	0.035	Tramo con piedras grandes, empozamientos y bifurcaciones, bancos empastados, diámetros de roca hasta 1 metro
3	0.025 0.03 0.035	Intervención antropogénica con conformación de taludes de rugosidad homogénea y con conformación de rocas en forma homogénea en el fondo del cauce. Presencia de material de textura media en el fondo y bancos, con algunas excepciones donde sobresalen conformaciones rocosas
4	0.024 0.03	Fondo del cauce de textura media, con bancos empastados o presencia de plantaciones.

- Condiciones de la Modelación:

Para modelar en condiciones de flujo no variado se requiere información del régimen de flujo, condiciones de borde y caudales máximos.

- Régimen de flujo: la modelación actual se realizó para condiciones de caudal no variado y bajo el régimen de flujo mixto (subcrítico y supercrítico). El Cuadro 7 muestra los caudales utilizados para la modelación de acuerdo a los periodos de retorno establecidos: 2, 5, 10 y 17 años.

Cuadro 7. Caudales máximos por periodo de retorno usados en el modelo hidráulico

Río	Trayecto	Sección	Caudales (m ³ /s)			
			Tr=1años	Tr=5años	Tr=10años	Tr=17años
Abuy	1	1424.736	88.368	143.466	167.195	167.582
Cerere	1	1796.957	240.239	390.029	454.54	455.591
Estrella	1	2850.603	904.56	1468.555	1711.455	1715.41
Estrella	2	1091.826	1233.167	2002.05	2333.19	2338.582
Estrella	3	11500	1328.01	2156.026	2512.635	2518.441
Estrella	3	2971	1457.32	2992.91	3487.94	3496
Estrella	4	13398.13	1843.49	3207.095	3737.551	3746.188
Niney	1	3480.607	1975.418	214.185	249.611	250.188
Suruy	1	1628.814	131.928	153.977	179.445	179.859

- Condiciones de borde: con el fin de establecer los niveles iniciales de agua en los extremos del sistema (trayectos con extremos libres) tanto en el cauce principal como en los afluentes, se establecieron las siguientes condiciones de borde: Pendiente normal: para esta condición de borde se seleccionó la pendiente media del cauce. Todos los trayectos sin conexión aguas arriba (trayectos libres) tanto del cauce principal como de afluentes utilizaron esta condición de borde.

Cuadro 8. Condiciones de borde para los trayectos libres

Trayecto	Pendiente (m/m)
Estrella, aguas arriba Trayecto 1	0.0203
Abuy	0.0040
Cerere	0.0101
Suruy	0.0088
Niñey	0.0061

Para la desembocadura se consultó la tabla de mareas del Instituto Meteorológico Nacional y se seleccionó la marea alta de 1.1 m.s.n.m para aguas abajo del trayecto 4 del río La Estrella.

4.3 Modelación en dos dimensiones

4.3.1 Estudio Hidrológico

Como base del modelo hidrológico se utilizó información de diversas fuentes, los datos de lluvia se obtuvieron del proyecto Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales conocida por sus siglas en inglés como TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), los datos de intensidad de lluvia se ofrecen en una grilla de 25 grados por 25 grados desde los 50° norte hasta 50° sur y de los 180° este hasta los 180° oeste. La información se recopiló en archivos de extensión HDF “Hierarchical Data Format” guardando el valor de intensidad en periodos de 3 horas, de las 00:00 a las 21:00, para un total de 8 archivos diarios, el proyecto está en funcionamiento desde 1998 hasta la fecha. Para el análisis de las lluvias sobre la cuenca del río La Estrella se utilizaron 6 puntos de información que se nombraron como Estación 1 a Estación 6 (Figura 5).

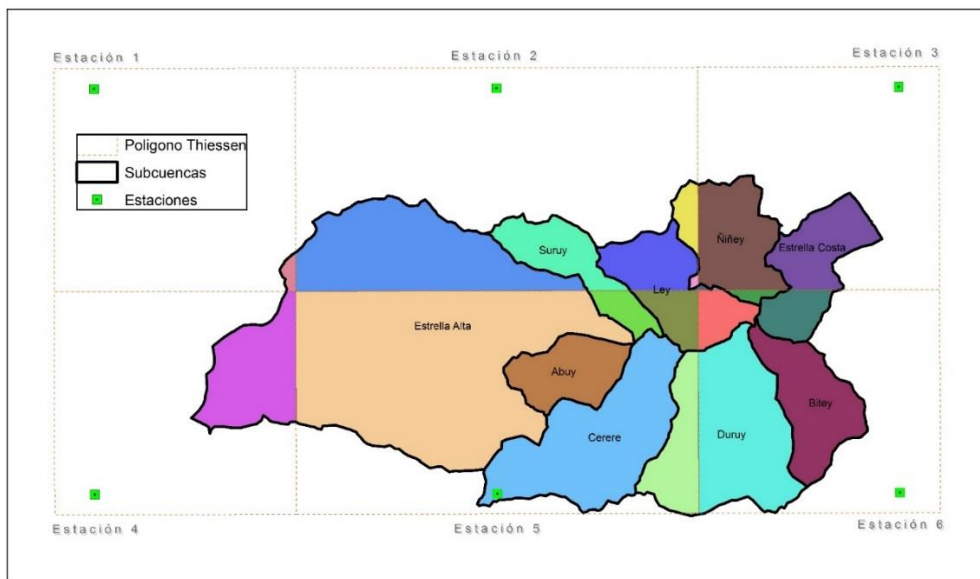


Figura 5. Áreas de influencia de las estaciones sobre las sub cuencas del Río La Estrella.

Se utilizó la metodología de Polígonos de Thiessen para obtener las áreas de influencia de cada una de las estaciones. Los hietogramas utilizados corresponden al evento de lluvia que provocó la mayor crecida registrada en el limnógrafo ubicado en la localidad de Pandora y que corresponde al periodo del 30/11/2002 al 02/12/2002 (ver Figura 6).

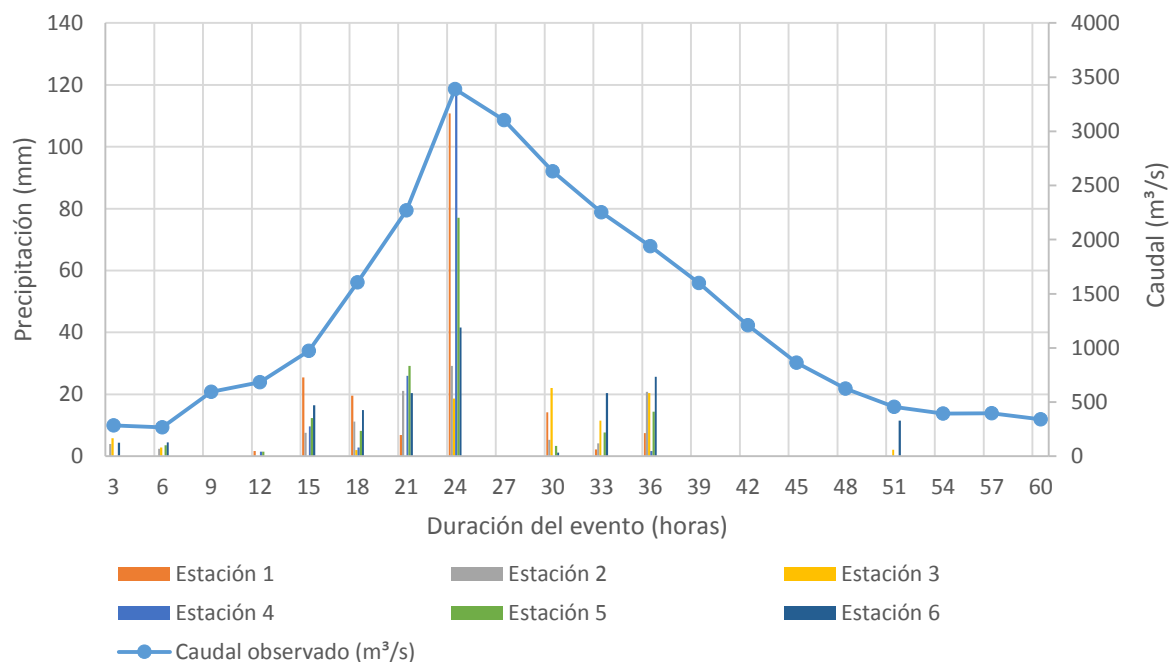


Figura 6. Histograma y caudal observado del evento de mayor magnitud registrado a la altura del puente en la localidad de Pandora.

El programa hidrológico utilizado es el HEC-HMS 4.2, la estructura de la cuenca del río La Estrella para programar el modelo se sub dividió en un total de 9 subcuentas, en las cuales se utilizó tanto para la estimación de las pérdidas como para la transformación de precipitación en caudal el método de Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. El Número de Curva de las 9 subcuentas se obtuvo contemplando cobertura, suelo y pendiente. Las series de lluvia corresponden a los histogramas de las 6 estaciones y la calibración se realiza por medio del hidrograma que se muestra en la Figura 7.

El modelo no logra alcanzar el pico máximo de 3389.2 m³/s, pero si logra replicar tiempo al pico dado que lo que se desea del modelo es obtener los hidrogramas de las 9 cuencas para alimentar los modelos hidráulicos, se realiza el siguiente procedimiento para generar hidrogramas para diferentes periodos de retorno.

Se tomaron los hidrogramas de las 9 sub cuencas y se dividieron entre el caudal pico modelado de la estación Pandora, estos fueron utilizados como hidrogramas base y guardando una relación con los caudales para diferentes periodos de retornos calculados

por medio de series de datos históricos de esta misma ubicación, permitiendo relacionarlos con el comportamiento de las subcuentas, por tal razón se hizo el supuesto que la distribución espacial y temporal de la lluvia es la misma para los diferentes eventos de crecidas extraordinarias.

Para obtener los hidrogramas para cada uno de los periodos de retorno se multiplicaron los caudales base por el caudal correspondiente obtenido en la estación Pandora.

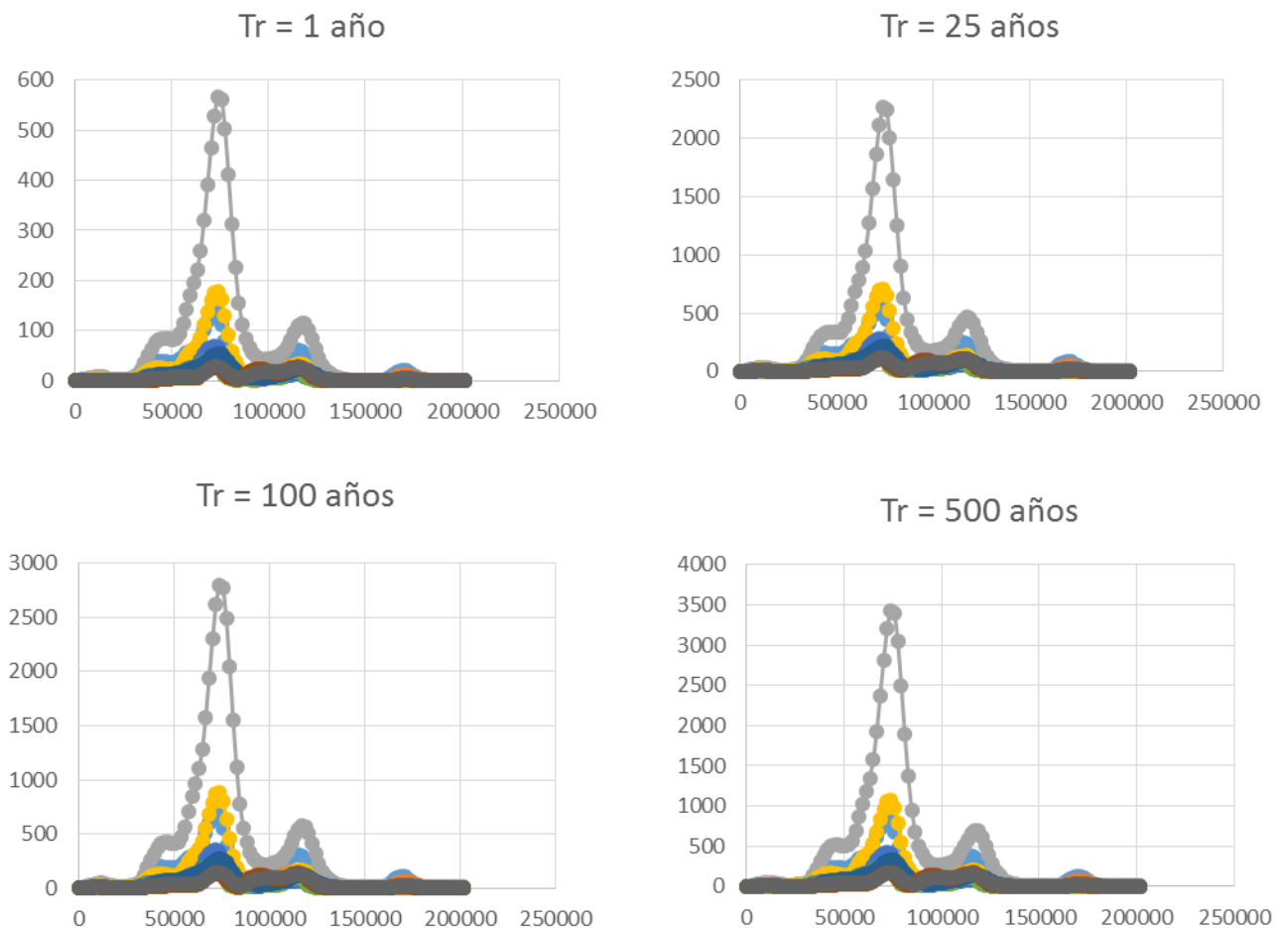


Figura 7. Hidrogramas para diferentes periodos de retorno.

El registro de caudales máximos se muestra en el Cuadro 9, se obtuvo de la estación operada por Standard Fruit Company a la altura del puente de Pandora.

Cuadro 9. Registros históricos de caudales máximos en la estación Pandora

Año	Caudal (m ³ /s)
2002	3496
2005	2515

Año	Caudal (m ³ /s)
2008	1750
1996	1700
1991	1530
1993	1480
2000	1200
2004	1184
1997	1150
2001	1150
1999	1130
2006	1064
2003	950
1994	754
1992	750
1998	553

La serie de datos utilizada comprende un total de 16 años, utilizando el método de Gumbel se hizo una extrapolación para obtener caudales para periodos de retorno de 1, 5, 10, 15, 25, 50, 75, 100, 500.

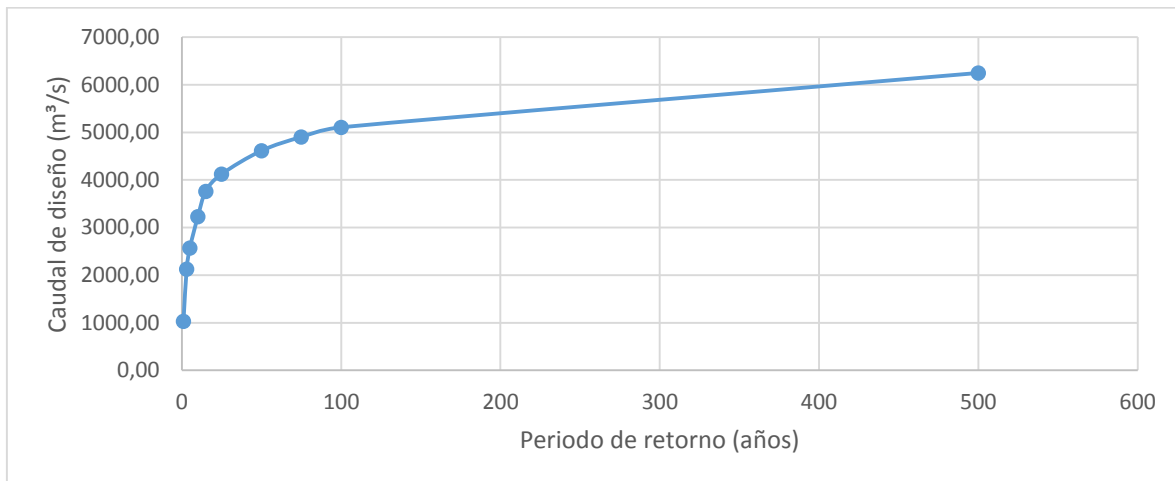


Figura 8. Caudal de diseño para diferentes periodos de retorno

Cuadro 10. Caudales de diseño para periodos de retorno seleccionados.

Tr (años)	Qd (m ³ /s)
1	1031.50455
3	2124.39677
5	2570.25807
10	3225.5234

Tr (años)	Qd (m ³ /s)
15	3760.62389
25	4122.91233
50	4614.50711
75	4902.07162
100	5106.10188

Análisis estadístico de los datos de precipitación TRMM

Utilizando las intensidades máximas mensuales con duración de 3 horas, desde enero de 1998 hasta septiembre del 2016, se realizó un análisis de las anomalías mostradas para los 6 puntos de información utilizados del proyecto TRMM.

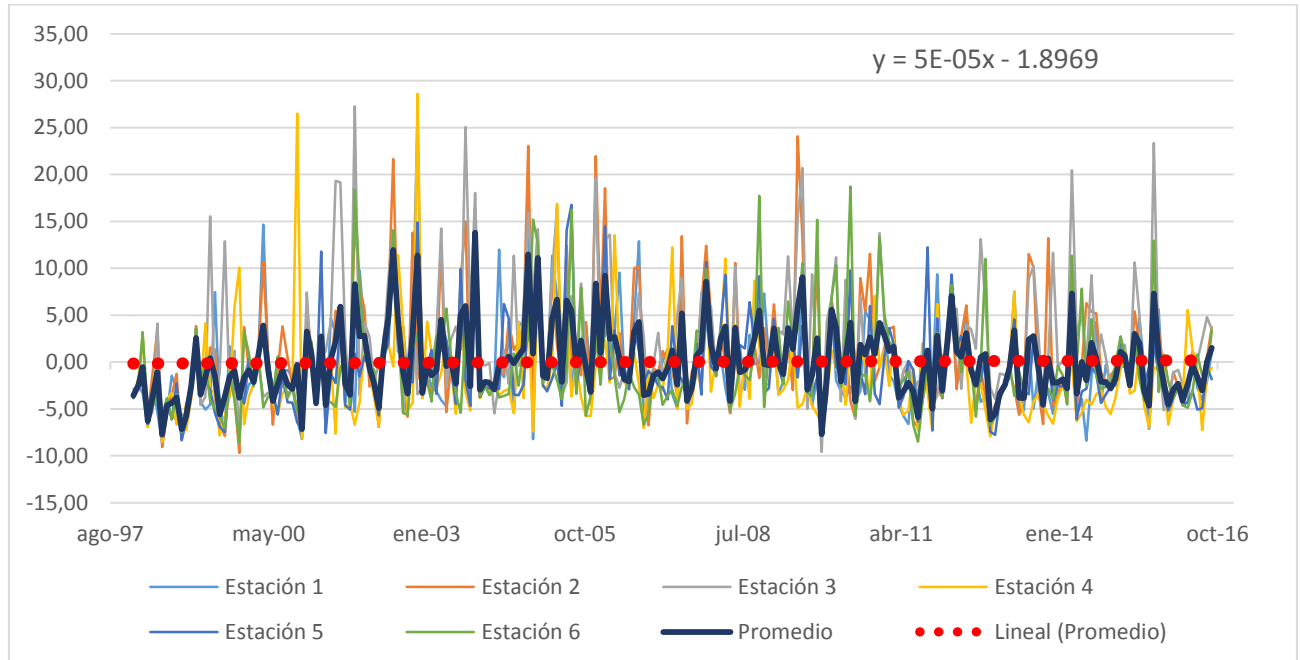


Figura 9. Anomalías de la intensidad de precipitación

Se aplicó el método de mínimos cuadrados con el fin de determinar en primera instancia la existencia de una tendencia, se obtuvo que la pendiente de la línea es de 5×10^{-5} . Al aplicar la ecuación obtenida y extrapolar a 50 años se obtienen escenarios que no superan a los planteados para los periodos de retorno de 5 años. Por lo que se tomó la decisión de no modelar estos escenarios dado que no aportaran, ni arrojaran datos relevantes a la investigación.

4.3.2 Modelación hidráulica de la parte baja del río

La geometría se realizó separando las zonas en donde se requiere de mayor detalle lo que significa la asignación un tamaño de malla menor, se realizó contemplando ancho de estructuras, topografía y vulnerabilidad.



Figura 10. Base geométrica para la modelación

Se realizó utilizando el proceso de malla no estructurada la cual puede ser utilizada para áreas irregulares. Se utilizaron 4 tipos de tamaños 5 m y 10 m para las áreas en donde se ubican diques, cauces angostos o canales primarios, 15m para los restantes cauces y 50m para las restantes zonas.



Figura 11. Distribución del tamaño de malla para la modelación

Asignación de coeficientes de Manning de forma automática por medio de un archivo raster en formato ASCII, con valores numéricos, asociados a una cobertura por medio de un archivo .csv que contiene la equivalencia del número al tipo de cobertura. Las coberturas se crearon en el software IBER, los coeficientes de los cauces se definieron por comparación de características con los valores obtenidos de U.S. Geological Survey.

4.4 Transporte de sedimentos

Para la simulación de transporte de sedimentos del Río la Estrella, se utilizó el programa IBER 2.4.1, que permite realizar transporte en suspensión y de fondo para flujo no uniforme.

4.4.1 Modelo de Turbulencia

El modelo de turbulencia que se utilizó es el de ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS), para la aproximación de las variables que exige el método RANS se configuró el programa IBER para utilizar el modelo k-ε, debido a que es el método más utilizado por los programas comerciales de estudio de flujos (Pérez, 2013). La ecuación utilizada para determinar la viscosidad turbulenta es:

$$V_t \sim \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2)$$

Donde, V_t es la viscosidad turbulenta, k energía cinética y ε tasa de disipación de energía, la cual según Chou (1945) la define como;

$$\varepsilon \sim \frac{k^{3/2}}{L} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

L es la longitud del trayecto, esta relación se utiliza para valores de Reynolds bajos, para valores altos se utiliza:

$$\varepsilon = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 : i, j = 1, 2, 3 \dots \dots \dots (4)$$

Siendo; $\frac{d\bar{u}_i}{dx_i}$ el diferencial del cambio de la velocidad por unidad de longitud

4.4.2 Transporte de sedimentos de fondo

El programa utiliza la ecuación 5, para determinar el cambio del fondo del lecho, describiendo los procesos de acumulación y erosión del material.

$$(1 - p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E \dots \dots \dots (5)$$

Donde; p es porosidad del material que conforma el lecho del río, Z_b elevación del fondo del río, $q_{sb,x}$ y $q_{sb,y}$ son las dos componentes del caudal sólido, E modela la suspensión de sólidos que se encuentran en el fondo del lecho y D la deposición o sedimentación de sólidos suspendidos.

4.4.3 Transporte de Sedimentos en suspensión

El programa IBER, para la modelación de tránsito de sedimentos en suspensión utiliza la ecuación:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hU_x C}{\partial x} + \frac{\partial hU_y C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(r + \frac{v_t}{S_{c,t}} \right) h \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial D_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{sy}}{\partial y} + (E - D) \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

C es la concentración de sólidos en suspensión promediada en la profundidad

U_x y U_y las componentes del vector velocidad en el plano horizontal

V_t es la viscosidad turbulenta, descrita anteriormente

Γ es el coeficiente de difusión molecular de sólidos en suspensión

$S_{c,t}$ es el coeficiente de Schmidt que varía entre 0.7 y 1.5

Dsx y Dsy describen el comportamiento de los sólidos suspendidos, en función de las diferencias de velocidad y de concentración del perfil vertical.

E modela la suspensión de sólidos que se encuentran en el fondo del lecho

D la deposición o sedimentación de sólidos suspendidos

La relación de E-D representa el balance entre el transporte de sólidos suspendidos y de fondo, existen distintas metodologías para realizar este proceso, sin embargo se eligió la de Van Rijn, debido a que está contenida dentro de las ofrecidas por el programa y requiere mínima información de entrada.

$$E - D = w_s(C_a^* - C_a) = \alpha w_s(C^* - C) \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

w_s velocidad de caída de los sólidos en suspensión

C^* es la concentración de sólidos suspendidos promediada en la profundidad en condiciones de equilibrio

C_a es la concentración instantánea de sólidos en suspensión

C_a^* Concentración en equilibrio para $Z = a$ sobre el fondo del río

a es el espesor de la capa en la cual se produce el transporte de fondo, está en función del diámetro del sedimento.

α es el coeficiente de la distribución de concentración en la vertical o perfil de Rouse, y se calcula a partir de

$$\alpha = \frac{h-a}{\int_a^h \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a}\right)^{w_s/k.u_*} dz}, \quad a = 3 \cdot D_{50} \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

D_{50} es el diámetro medio de los sólidos suspendidos, k es la constante de Von Karman ($k=0.41$).

Los datos utilizados concentración de sólidos en suspensión corresponden a la estación de Pandora, la serie inicia en 1998 y finaliza 2009, sin tener en apariencia una distribución temporal definida.

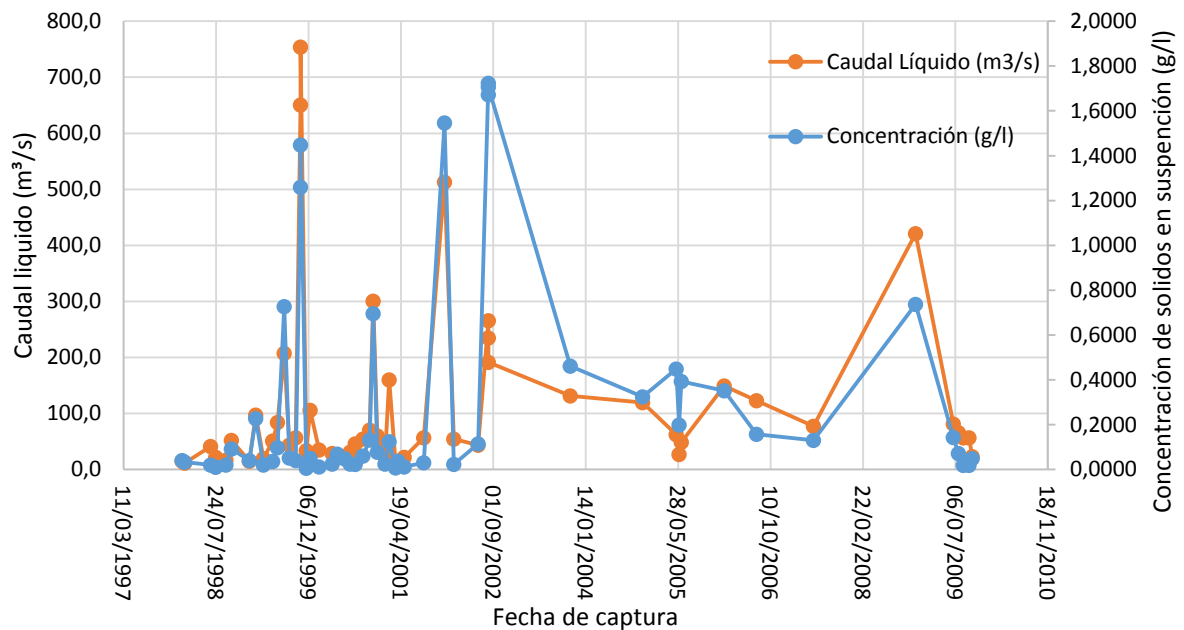


Figura 12. Datos de caudal líquido y concentración de sólidos en suspensión. Fuente (ICE, Estación Hidrométrica Pandora, Río La Estrella)

Con estos datos se realizó una correlación entre caudal líquido (Ql) y concentración de sólidos en suspensión (TSS), que permita extrapolar para obtener estimados de TSS para los hidrogramas utilizados en los diversos escenarios de crecidas.

La ecuación tendrá la forma:

$$SS = \alpha Q_l^\beta \dots\dots\dots(9)$$

Donde:

α y β son contantes que resultan de la aplicación del método de mínimos cuadrados.

Para aplicar el método de mínimos cuadrados se aprovecharon las propiedades de los logaritmos de forma que;

$$\log ss = \log \alpha + \beta * \log Q_l \dots\dots\dots (10)$$

Sustituyendo;

$$y = b + ax \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

$\log ss$ es y, b es $\log \alpha$, a es β y x es $\log Ql$.

Para lo que b y a se obtienen de:

$$a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \dots\dots\dots(12)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n} \dots\dots\dots(13)$$

Dónde:

n es el número del historial de mediciones

El cálculo del D50 de los sólidos en suspensión, se determinó utilizar un diámetro representativo de 0.05 mm que representa el umbral entre arenas y limos.

V. Resultados y análisis de resultados

5.1 Modelación en una dimensión

El Río La Estrella presenta en su parte alta, pendientes fuertes y sección transversal tipo “V” característico de los río Jóvenes, con energía suficiente para arrastrar sedimentos gruesos. Al ingresar al sector de la finca Valle La Estrella presenta un cambio brusco de pendiente, pasando a ser relativamente baja, esta característica favorece la deposición de los sedimentos arrastrados desde las partes altas, lo cual disminuye significativamente la capacidad hidráulica en el sector de estudio, situación que aunada al efecto de remanso provocado por el embudo natural, ha incrementado el riesgo y la frecuencia de las inundaciones. En la Figura 13, se observa el perfil longitudinal del cauce principal del Río La Estrella. Se diferencian cuatro pendientes promedio: desde la parte alta hasta el puente de Vesta (0.7%), del puente de Vesta al puente de Atalanta (0.2%), del puente de Atalanta hasta el puente de Bonifacio (0.1%) y del Puente de Bonifacio hasta la desembocadura la pendiente es nula. Para un periodo de retorno de 17 años se manifiesta un nivel de agua promedio de 9 m.s.n.m hasta aproximadamente 2000 m aguas arriba del puente de Atalanta. Se observa, la formación de la curva de remanso aguas arriba del puente de Pandora que se extiende hasta unos 400 metros aguas arriba del puente de Atalanta, el origen del remanso se debe principalmente al embudo natural que se forma a partir en el puente de Pandora. Este fenómeno, provoca tirantes de hasta 13 metros aguas.

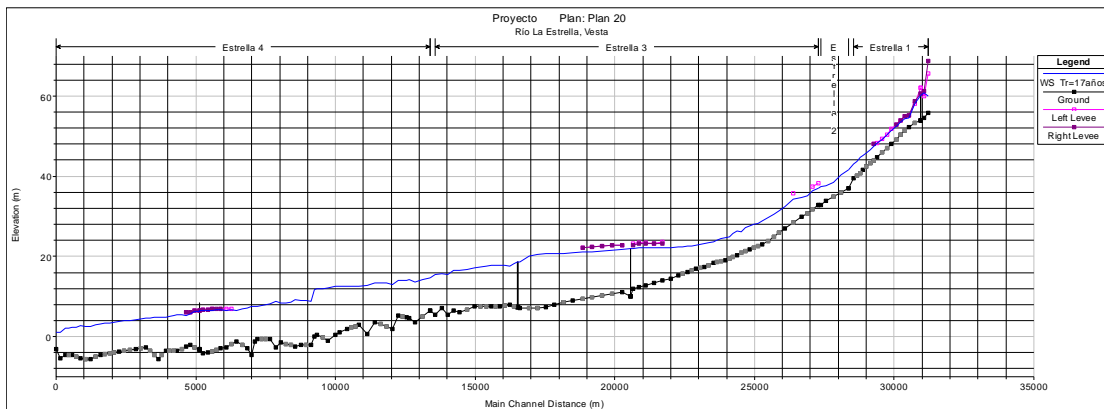


Figura 13. Perfil longitudinal del cauce principal del Río La Estrella

5.1.1 Manchas de inundación T=17 por trayectos

De acuerdo con el proceso de modelación, se obtuvo la siguiente secuencia de imágenes que ilustran las áreas de inundación para eventos con un periodo de retorno de 17 años.

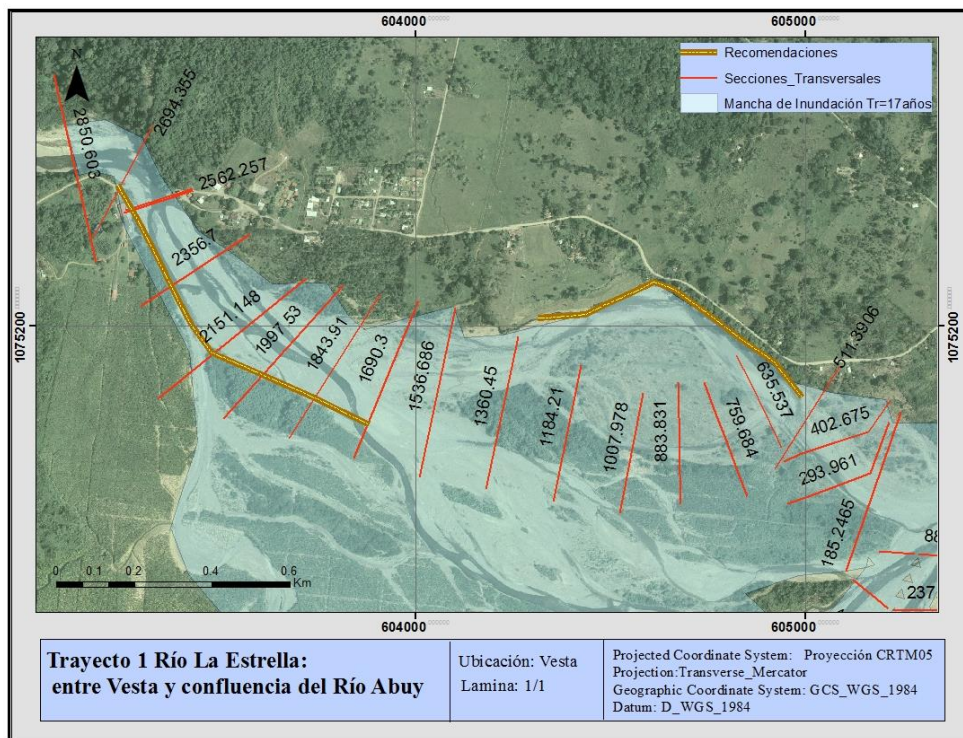


Figura 14. Planicie de inundación del tramo entre Vesta y el afluente Abuy.

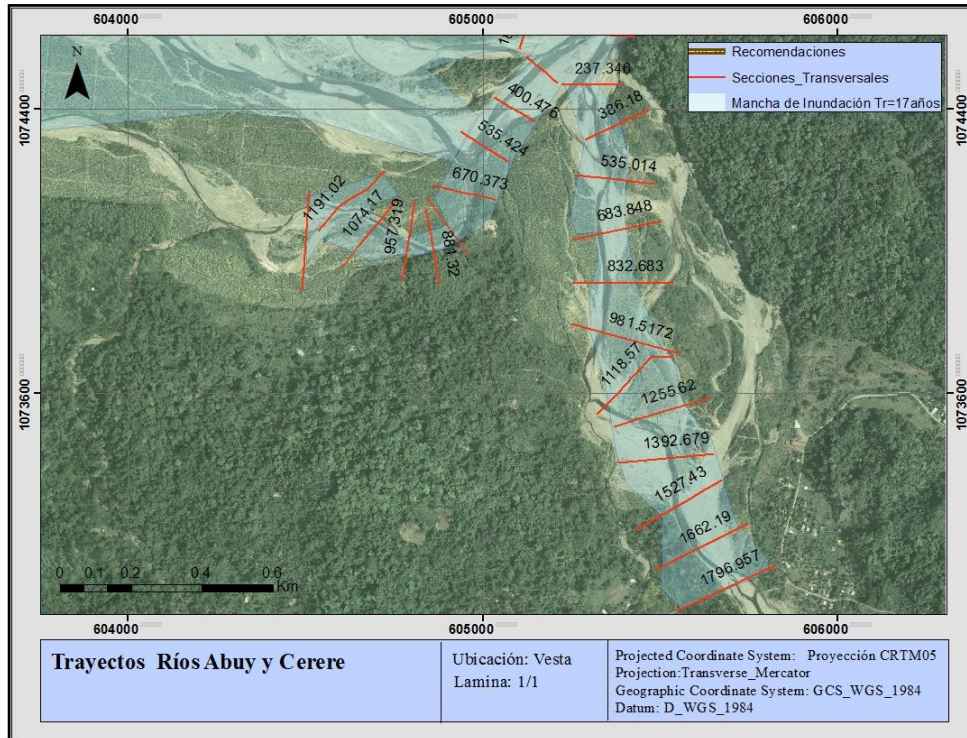


Figura 15. Planicie de inundación del tramo entre el afluente Abuy y el afluente Cerere.

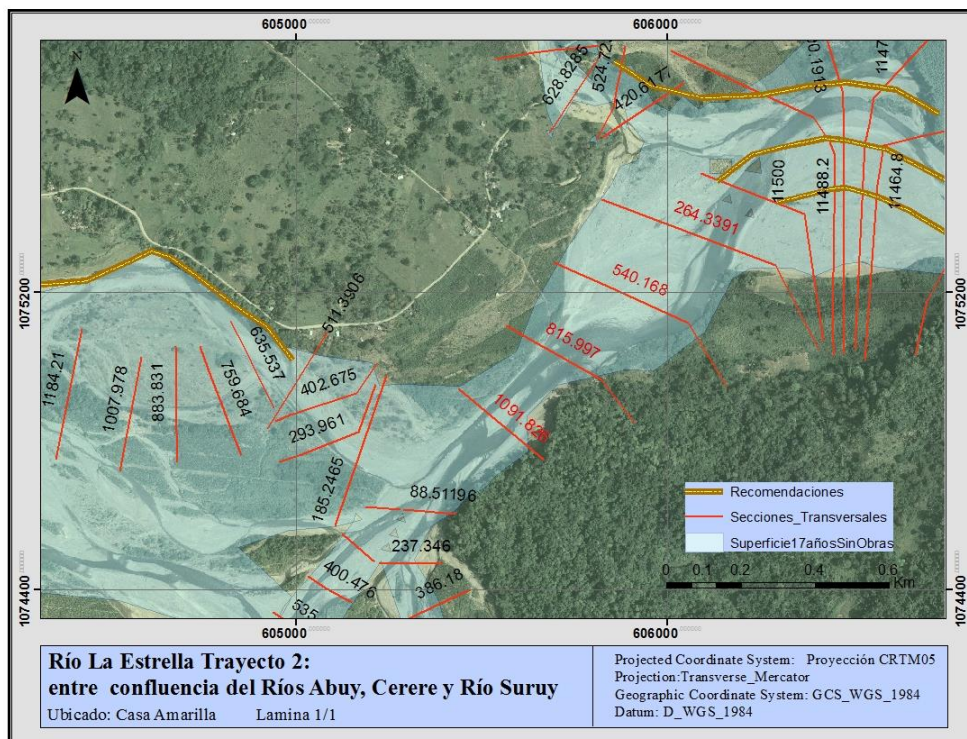


Figura 16. Planicie de inundación del tramo entre la confluencia de los afluentes Abuy – Cerere y el afluente Suruy.

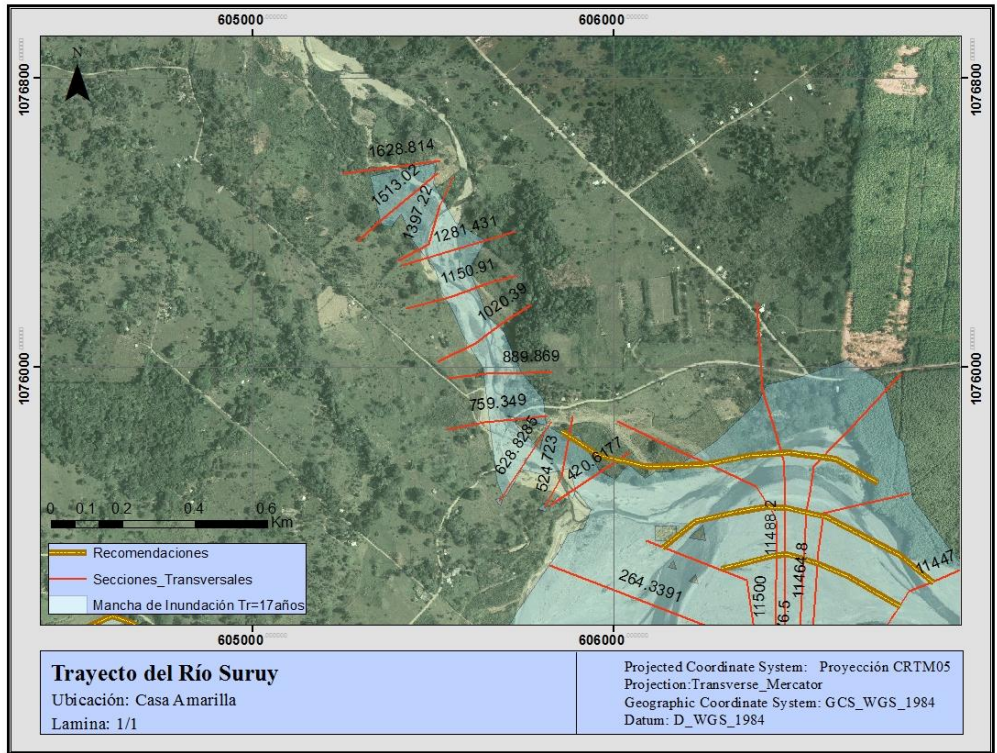


Figura 17. Planicie de inundación del tramo confluencia con el río Suruy.

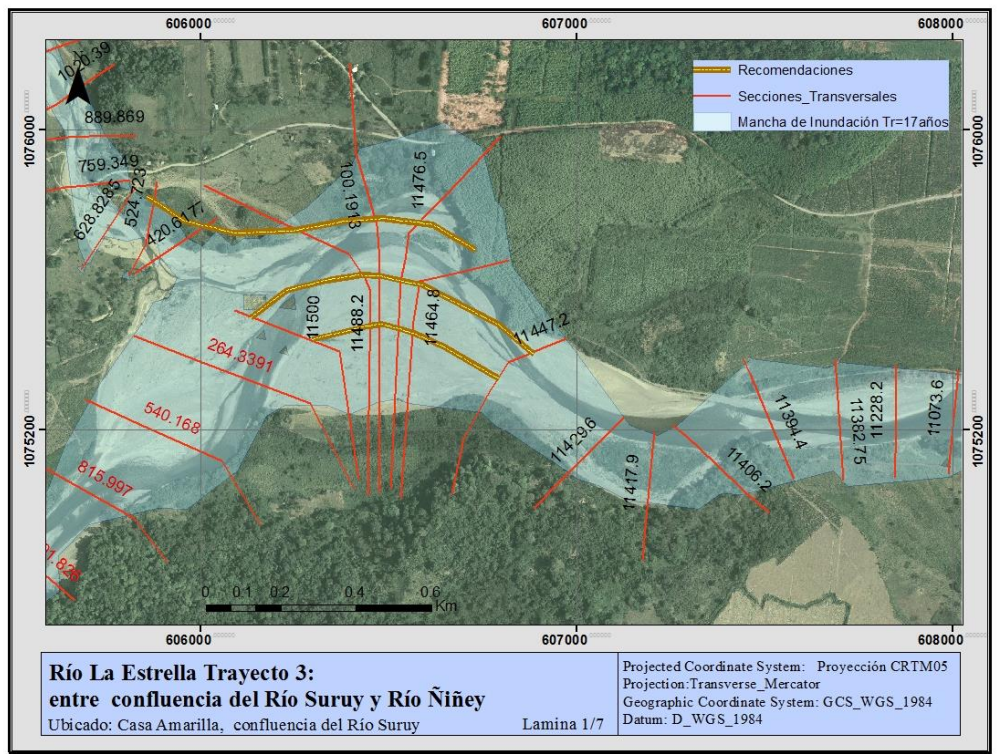


Figura 18. Planicie de inundación del tramo 1 entre los afluentes Suruy y Niñey.

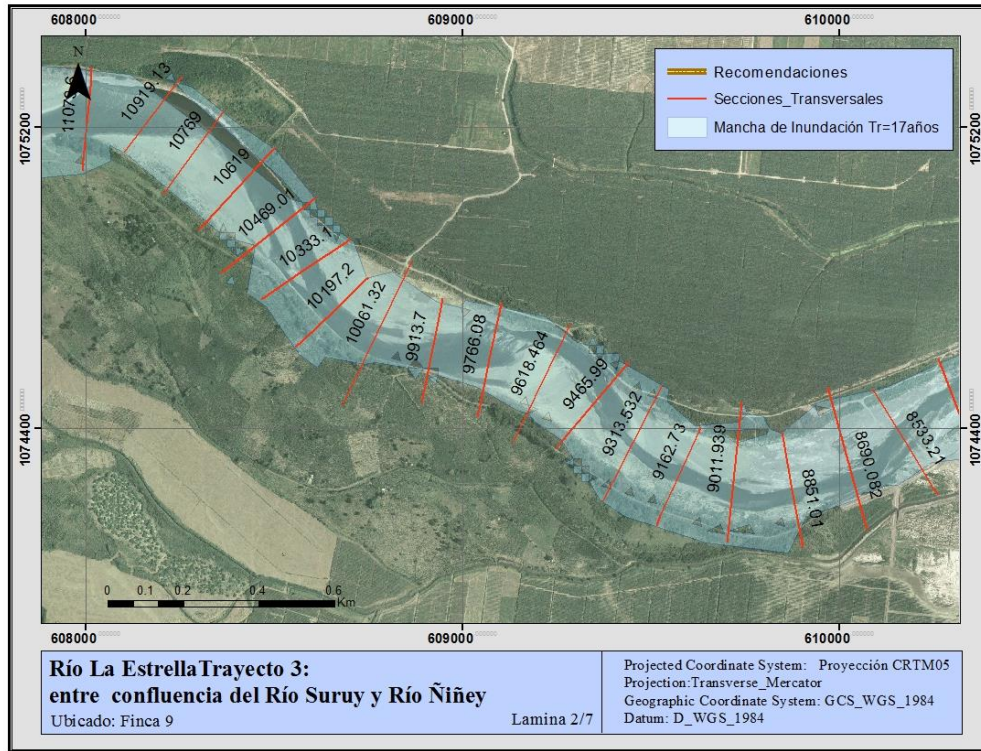


Figura 19. Planicie de inundación del tramo 2 entre los afluentes Suruy y Ñiñey.

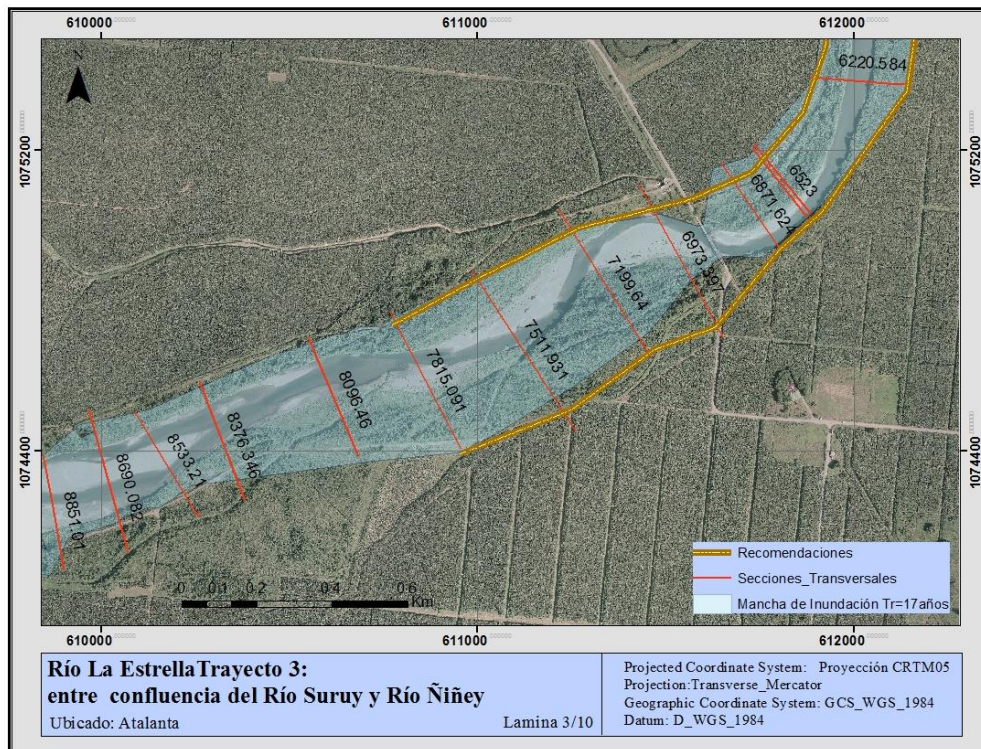


Figura 20. Planicie de inundación del tramo 3 entre los afluentes Suruy y Ñiñey.

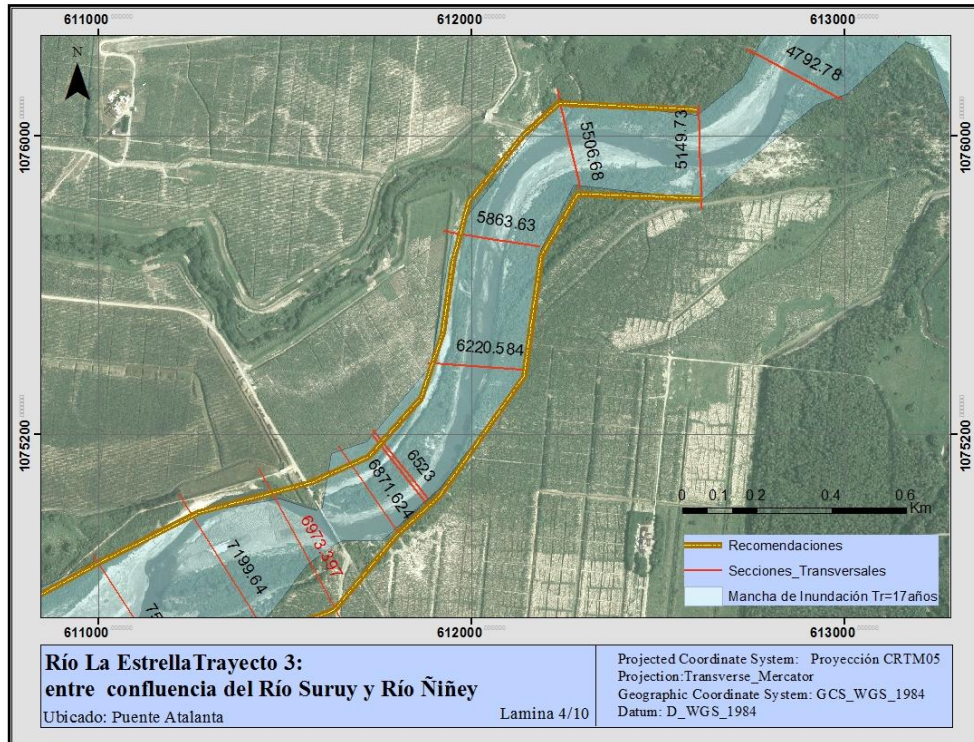


Figura 21. Planicie de inundación del tramo 4 entre los afluentes Suruy y Niñey.

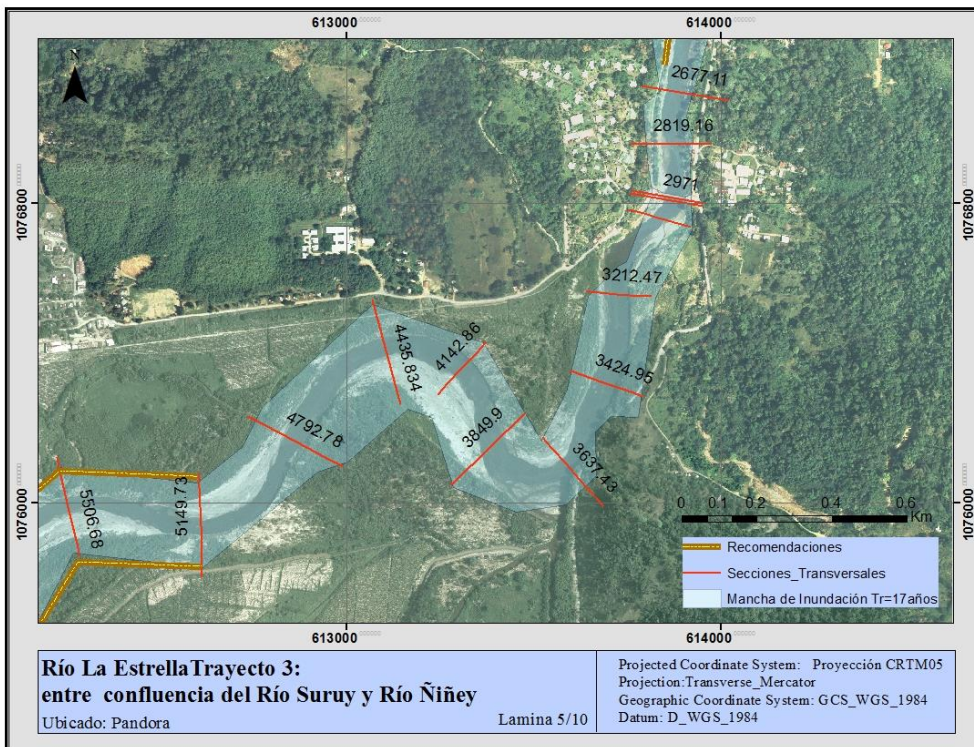


Figura 22. Planicie de inundación del tramo 5 entre los afluentes Suruy y Niñey.

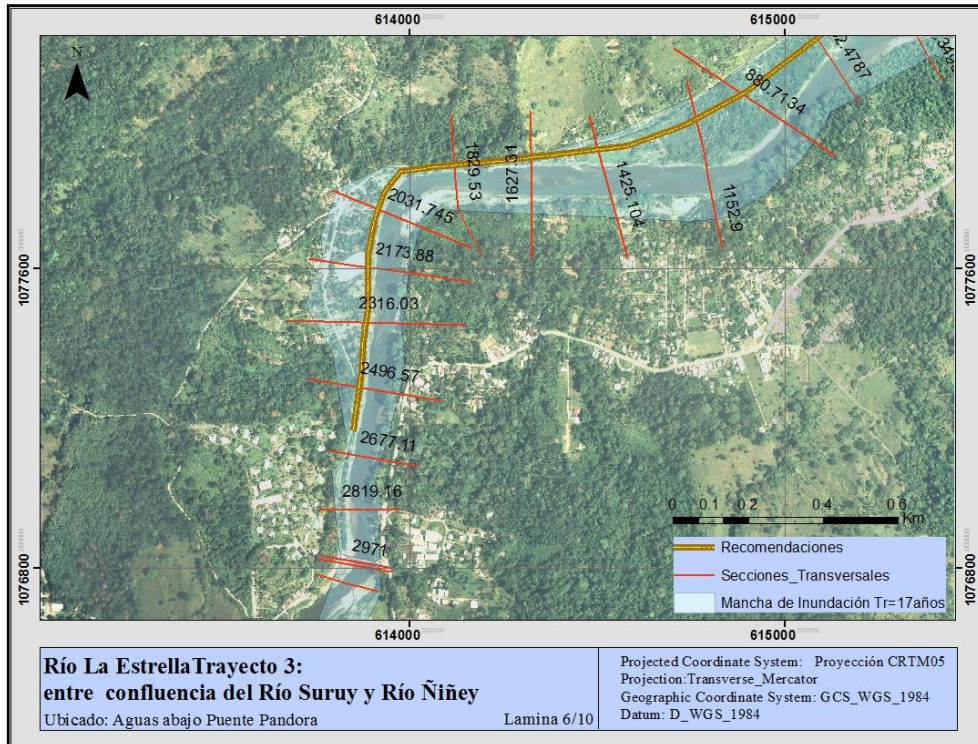


Figura 23. Planicie de inundación del tramo 6 entre los afluentes Suruy y Niñey.

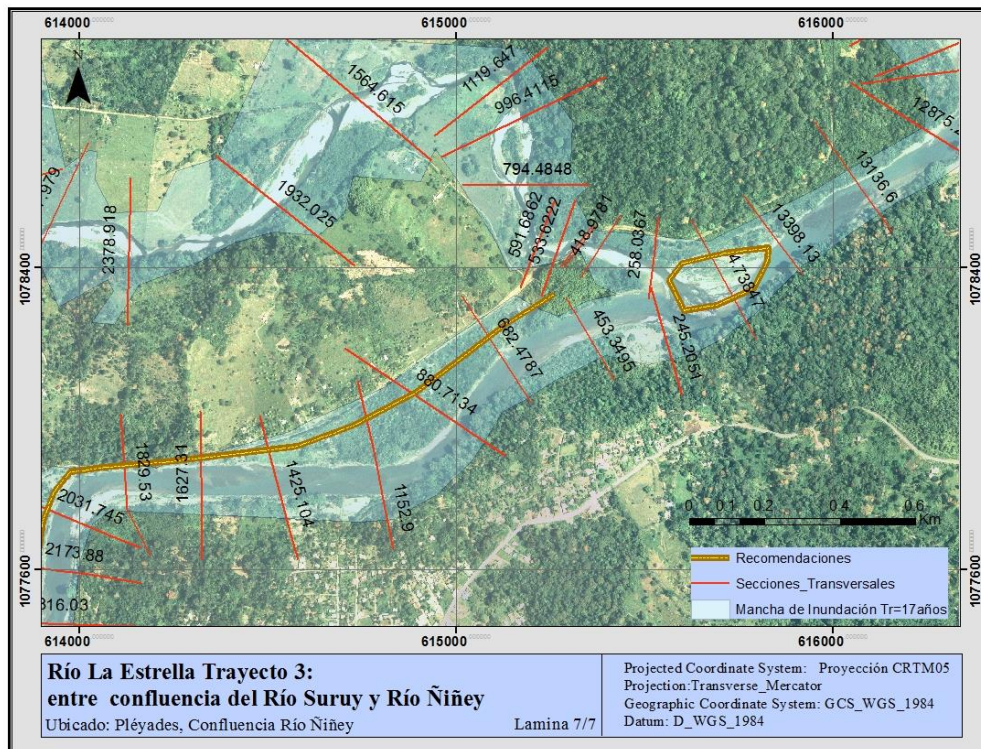


Figura 24. Planicie de inundación del tramo 7 entre los afluentes Suruy y Niñey.

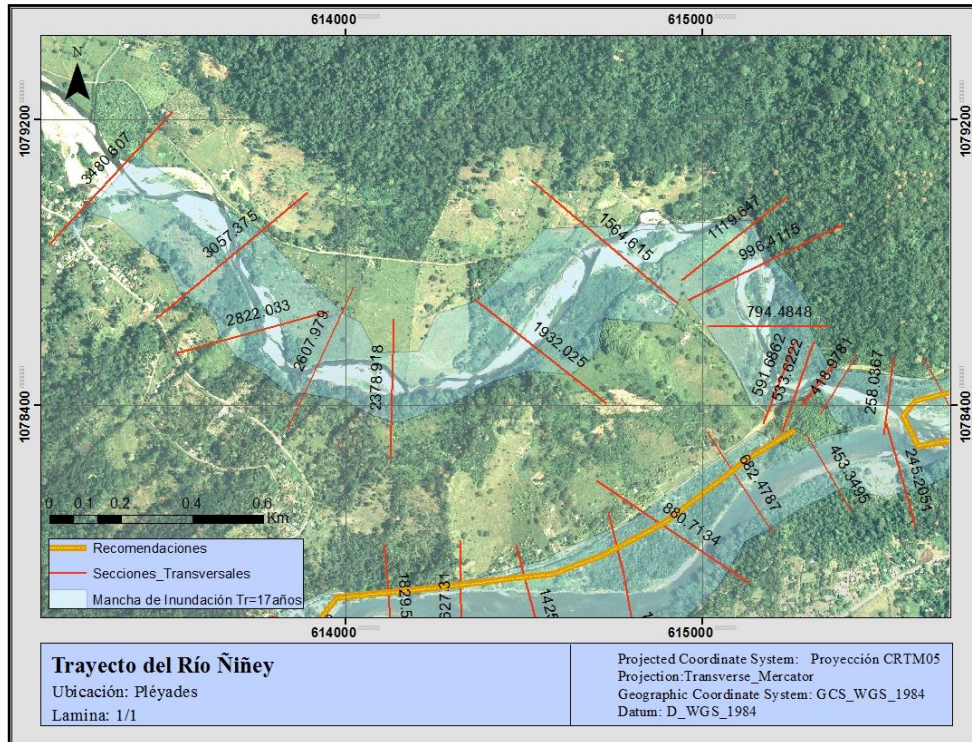


Figura 25. Planicie de inundación del río Niñey.

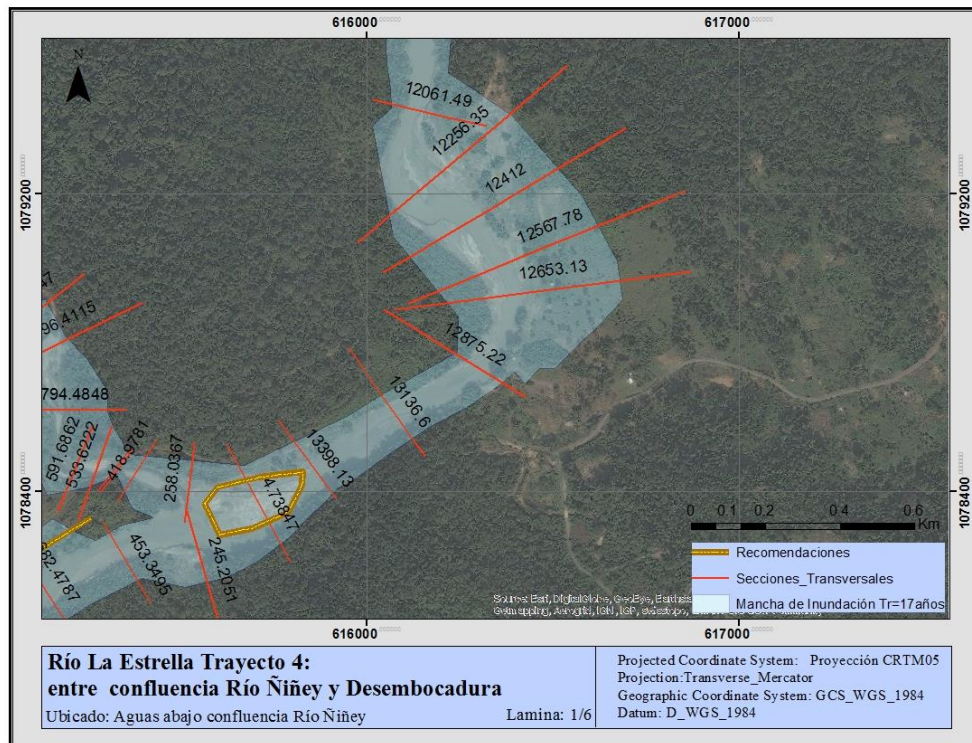


Figura 26. Planicie de inundación del tramo 1 entre la confluencia del afluente Niñey y la desembocadura en el mar.

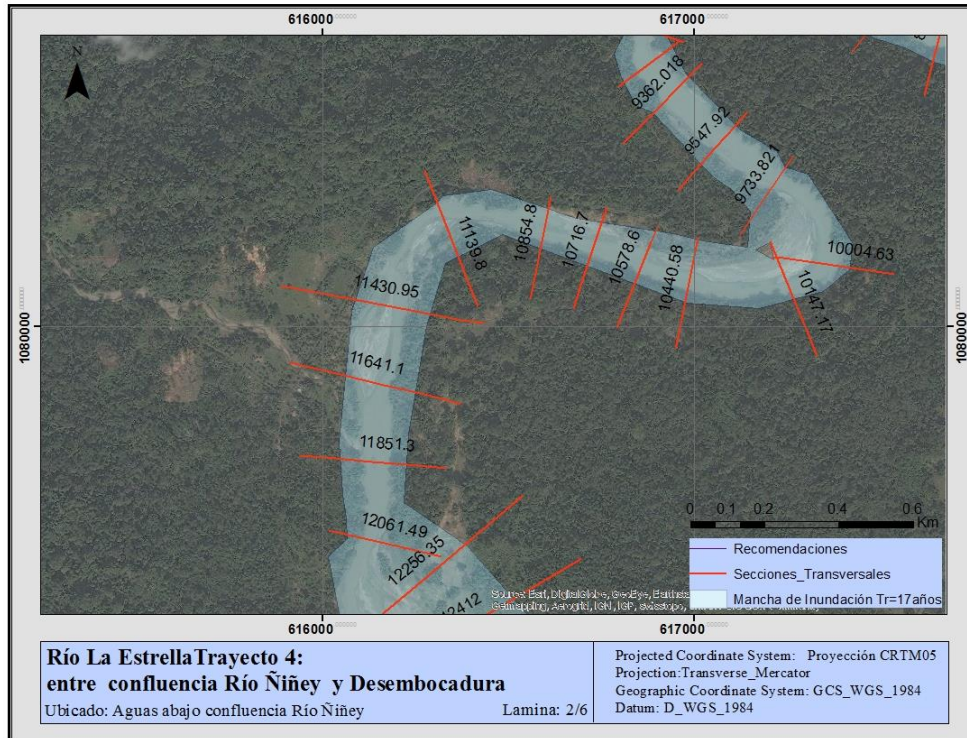


Figura 27. Planicie de inundación del tramo 2 entre la confluencia del afluente Niñey y la desembocadura en el mar.

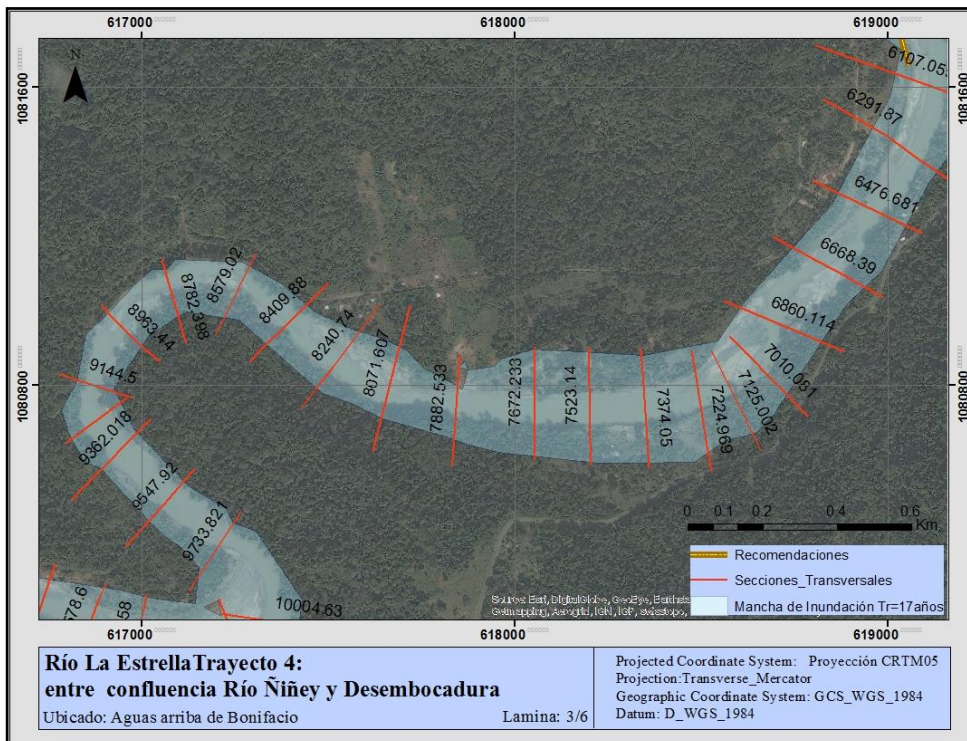


Figura 28. Planicie de inundación del tramo 3 entre la confluencia del afluente Niñey y la desembocadura en el mar.

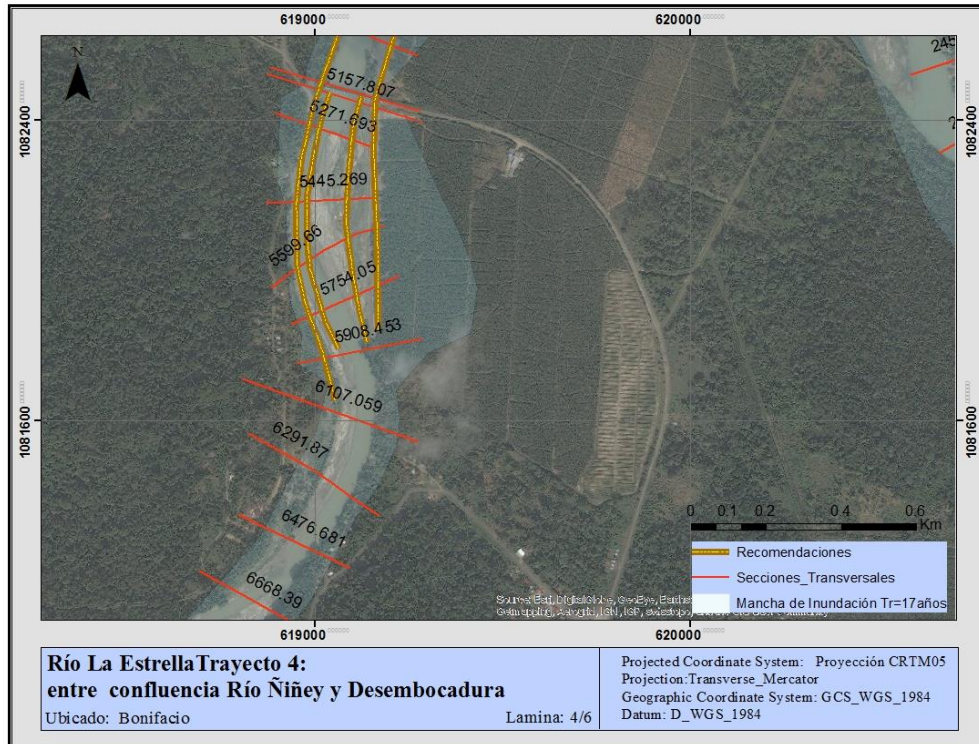


Figura 29. Planicie de inundación del tramo 4 entre la confluencia del afluente Niñez y la desembocadura en el mar.

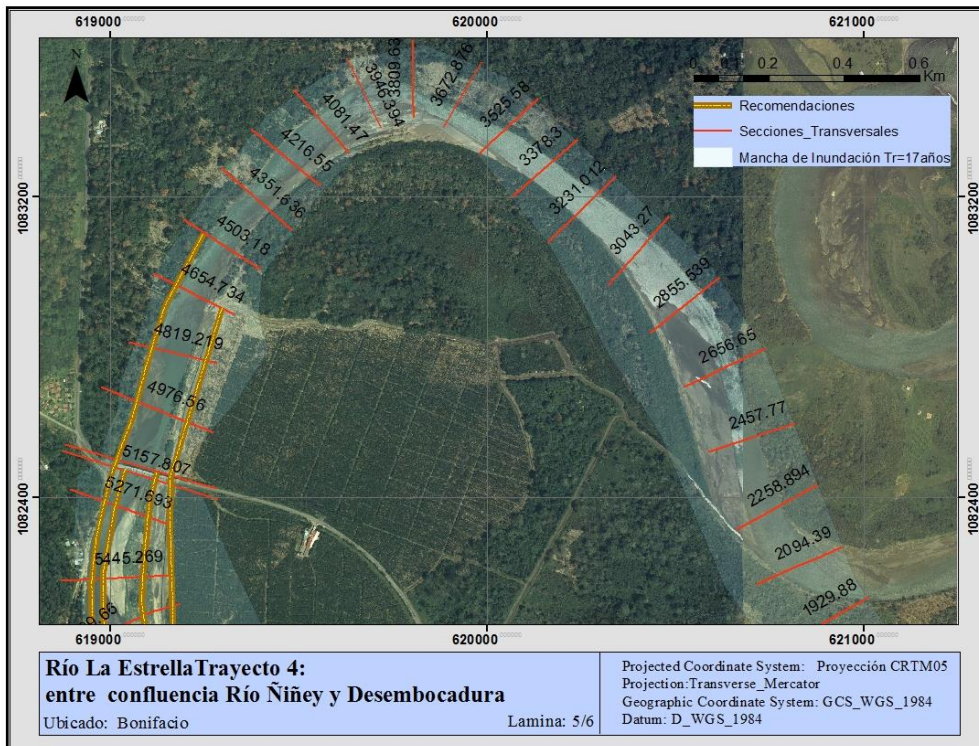


Figura 30. Planicie de inundación del tramo 5 entre la confluencia del afluente Niñez y la desembocadura en el mar.

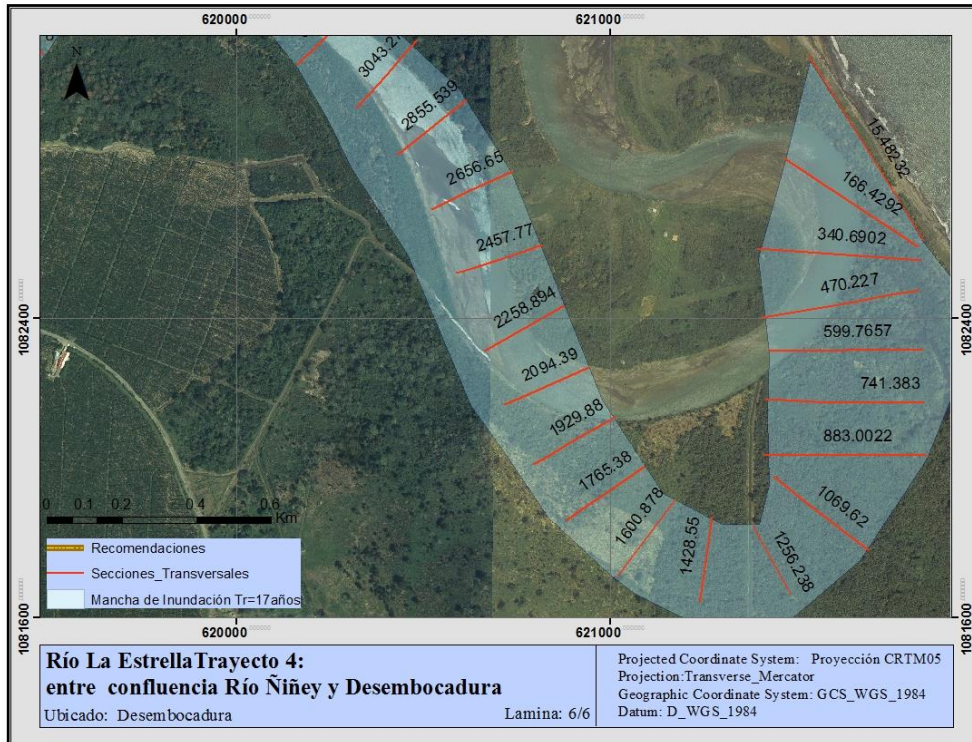


Figura 31. Planicie de inundación en la desembocadura del río La Estrella.

5.1.2 Secciones de áreas críticas y obras recomendadas

Se presentan las secciones que según la modelación hidráulica corresponden a las más críticas bajo el criterio de riesgo de desbordamiento. Cada una de estas secciones se muestra en su condición natural, es decir, sin la presencia de obras de protección o con las dimensiones actuales de ellas; también se presentan esas mismas secciones con el resultado de la colocación de alguna obra o el redimensionamiento de las existentes.

Sección Crítica 1:

Cuadro 11. Condiciones de la primera sección crítica en Vesta (Dique en la margen derecha)

Sección	Estación	Elevación Recomendada (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)
2694,355	176,71	61,28	60,05	1,23
2568,025	161,2901	60,68	59,04	1,64
2562,257	160,96	60,65	59,04	1,61

Sección	Estación	Elevación Recomendada (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)
2356,70*	224,51	58,68	57,38	1,31
2151,148	288,78	55,09	55,66	-0,57
1997,53*	296,36	54,89	54,51	0,38
1843,91*	303,94	53,96	53,35	0,61
1690,30*	311,52	52,86	52,20	0,66

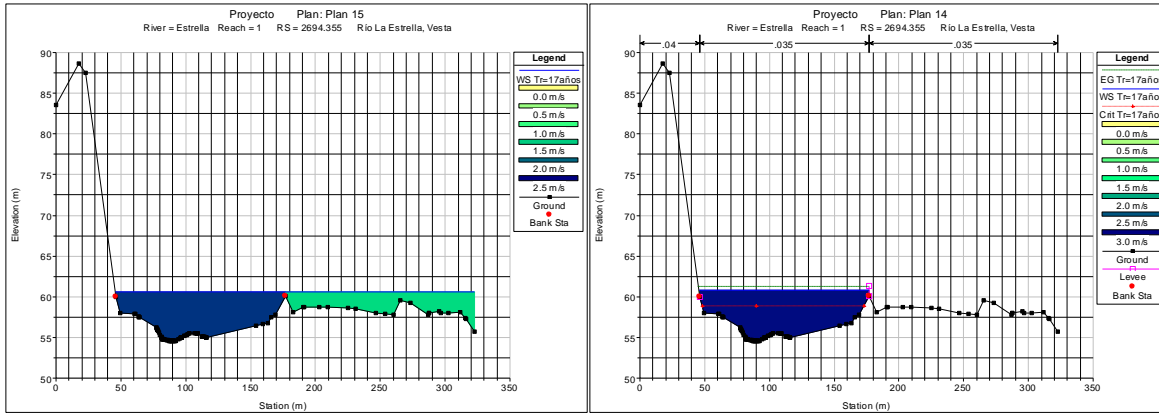


Figura 32. Modelación en la sección 2694,355 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

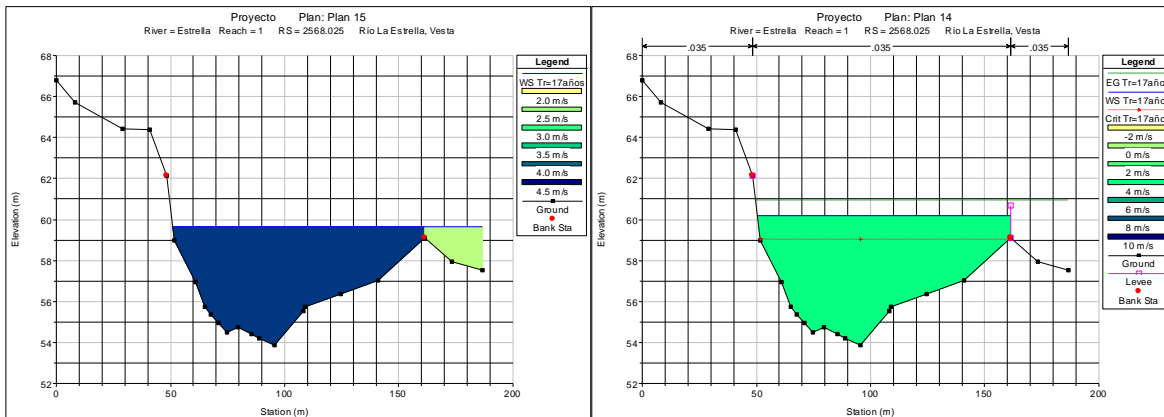


Figura 33. Modelación en la sección 2568,025 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

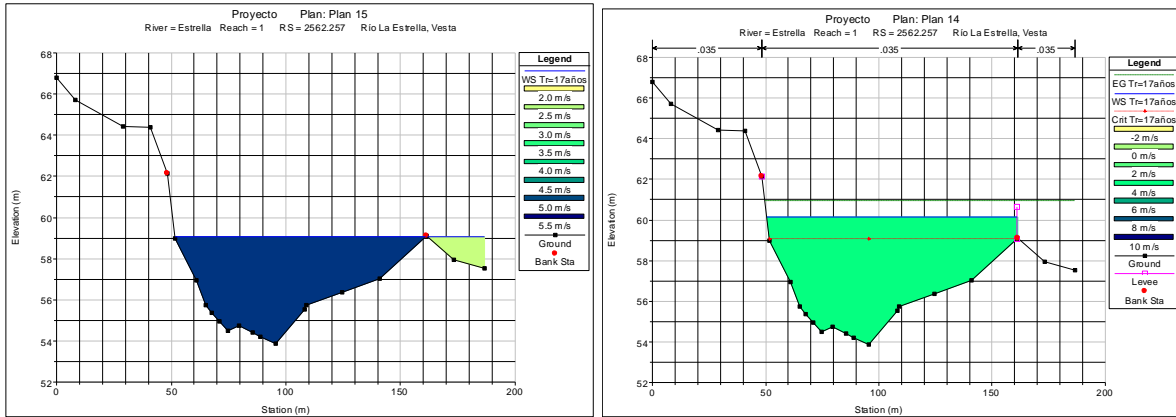


Figura 34. Modelación en la sección 2562,257 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

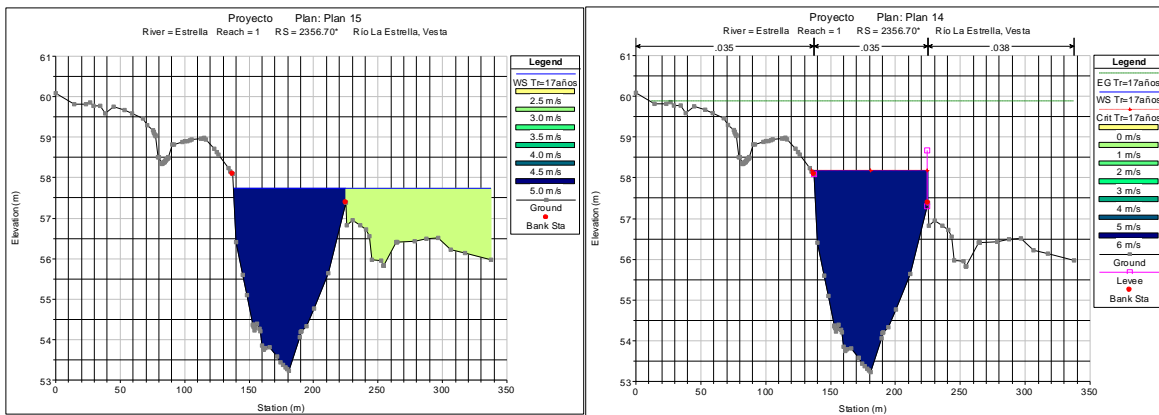


Figura 35. Modelación en la sección 2356,70* con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

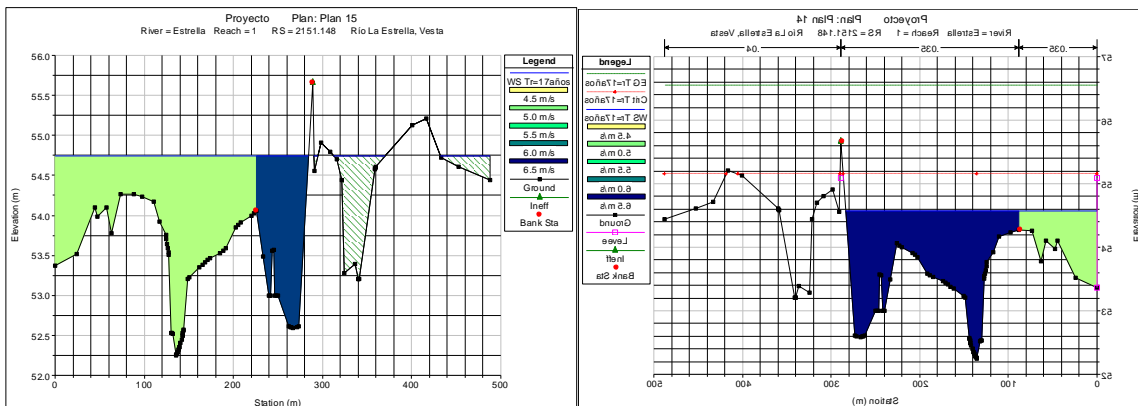


Figura 36. Modelación en la sección 2151,148 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

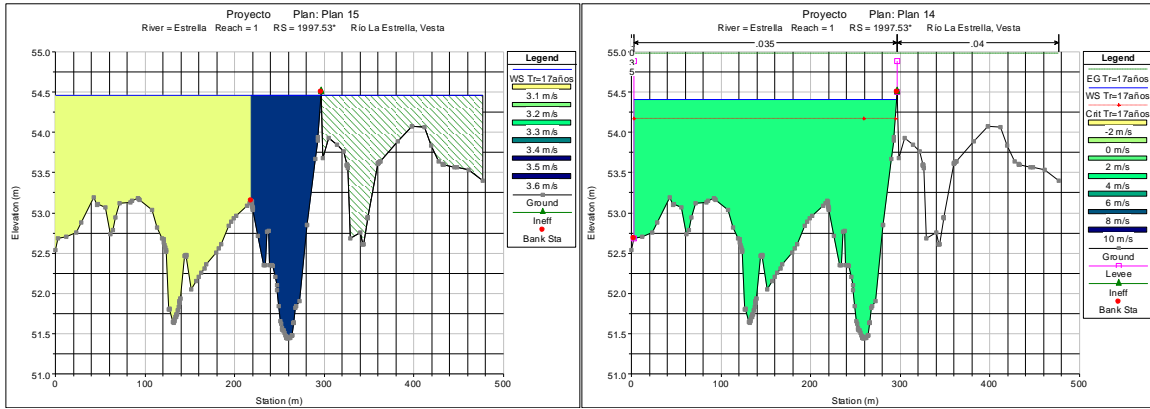


Figura 37. Modelación en la sección 1997,53* con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

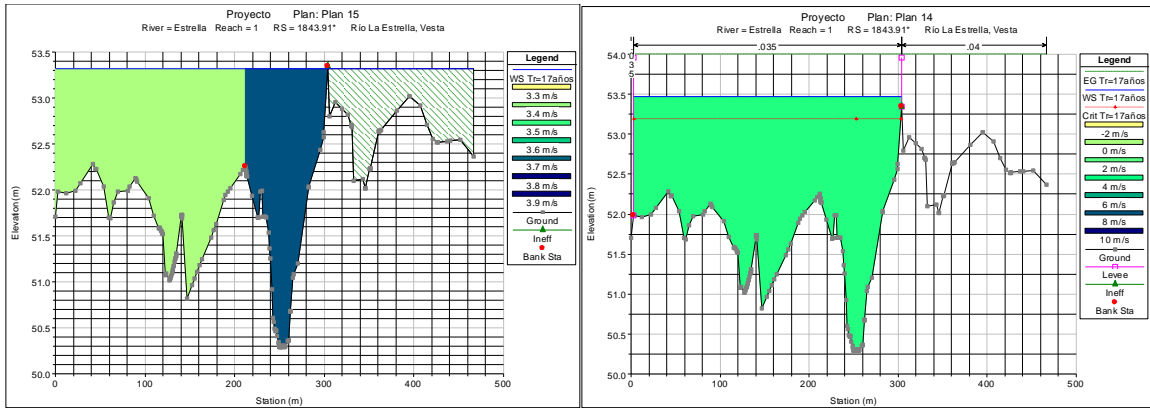


Figura 38. Modelación en la sección 1843,91* con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

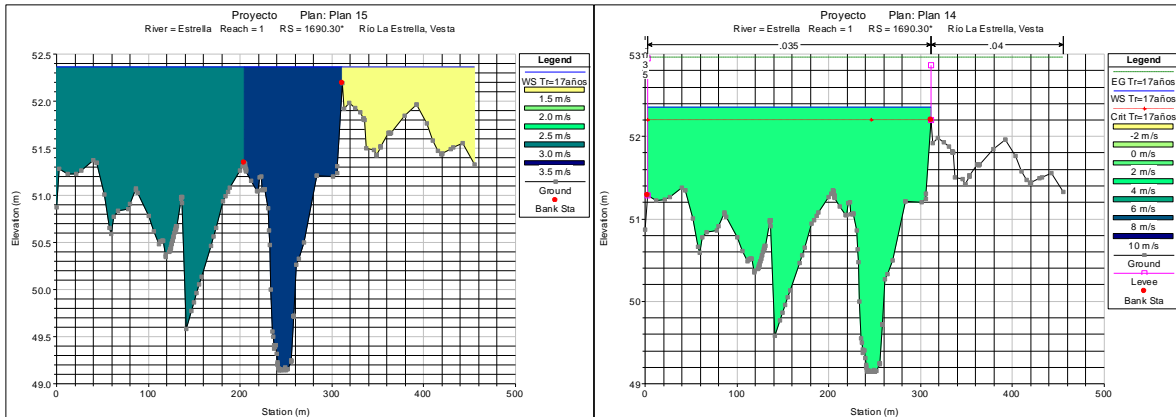


Figura 39. Modelación en la sección 1690,30* con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

Sección Crítica 2:

Cuadro 12. Condiciones de la segunda sección crítica en Vesta (Puente peatonal)

Elevación Recomendada (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)
60,68	58,97	1,71

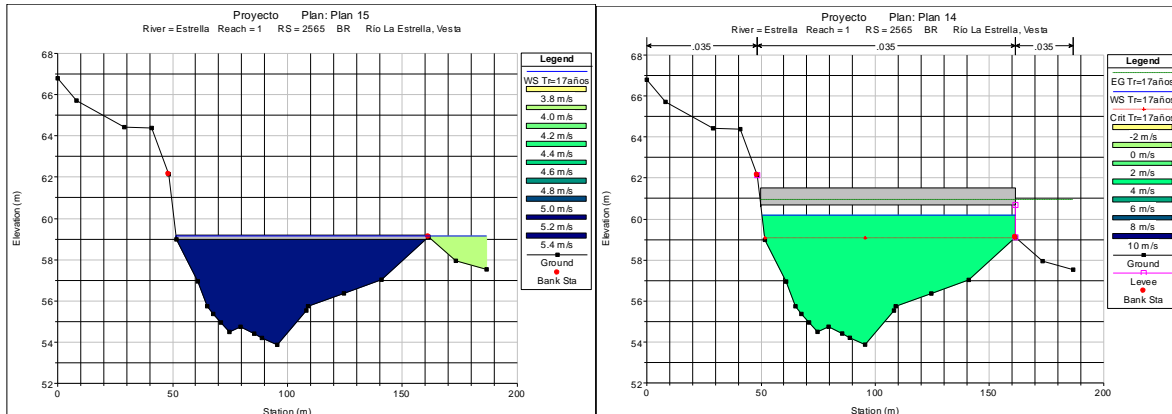


Figura 40. Modelación en la sección del puente peatonal en Vesta con la elevación actual (izquierda) y la elevación recomendada (derecha).

Sección Crítica 3:

No se tiene la suficiente información para establecer ubicación de la obra de protección en la localidad de Vesta cerca de Casa Amarilla, ya que las secciones topográficas no cubren toda la llanura de inundación. En fotografías aéreas se observa la huella de la crecida muy cercana a la calle que comunica a Vesta con Casa Amarilla, por lo que se recomienda una obra de protección.

Sección Crítica 4:

Las Obras consisten en la protección de margen e intervención del cauce, reacomodándolo para evitar el impacto directo del flujo sobre la cara externa del meandro.

Cuadro 13. Condiciones de la cuarta sección crítica en los tramos Estrella 4 y Estrella 5 (Dique)

Río	Sección	Estación	Elevación Recomendada (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)	Margen
Suruy	4020,6177	169,3	38,2	37,69	0,51	Izquierda

Estrella 3	11500,0000	35,34	38,2	37,31	0,89	Izquierda
Estrella 3	11488,2000	36,4	37,0	36,31	0,69	Izquierda

Cuadro 14. Volúmenes totales producto de la recaba del Río La Estrella 500 metros aguas abajo de la confluencia con el Río Suruy.

River:	Estrella	Reach:	3						
RS		Area L	Area Ch	Area R	Area T	Volume L	Volume Ch	Volume R	Volume T
		(m2)	(m2)	(m2)	(m2)	(m3)	(m3)	(m3)	(m3)
11500	Cut	0	197	0	197	0	44448	0	44448
	Fill	0	262	0	262	0	50316	0	50316
	Net	0	-65	0	-65	0	-5868	0	-5868
11488.2*	Cut	0	248	0	248	0	45861	297	46158
	Fill	0	241	0	241	0	42912	0	42912
	Net	0	7	0	7	0	2949	297	3246
11476.5*	Cut	0	211	3	214	0	35823	4559	40383
	Fill	0	188	0	188	0	36244	0	36244
	Net	0	23	3	26	0	-420	4559	4139
11464,8	Cut	0	147	43	190	0	22116	6394	28510
	Fill	0	175	0	175	0	26183	0	26183
	Net	0	-27	43	16	0	-4067	6393	2326
Total	Cut					0	148248	11250	159498
	Fill					0	155655	0	155655
	Net					0	-7407	11250	3843

Cuadro 15. Sección Propuesta

Estación (m)	Elevación (msnm)
0	35,84
8,003	37,84
14,003	37,84
24,003	35,96
75,003	35,84
90,453	32,75
180,453	32,75
195,903	35,84
200	35,84

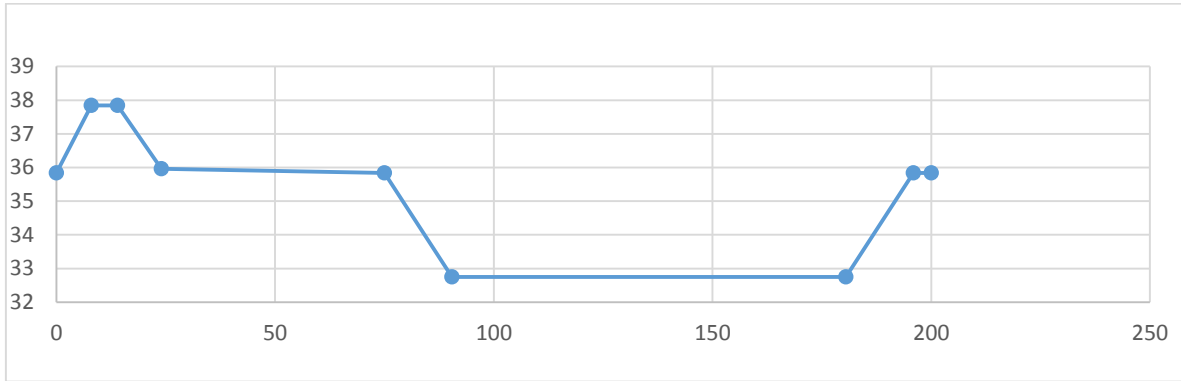


Figura 41. Sección Propuesta

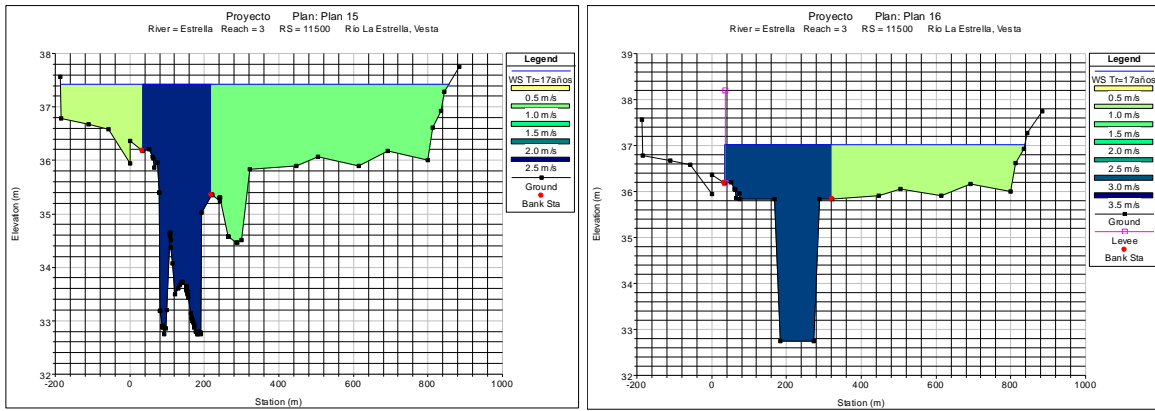


Figura 42. Modelación en la sección 11500 sin dique (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

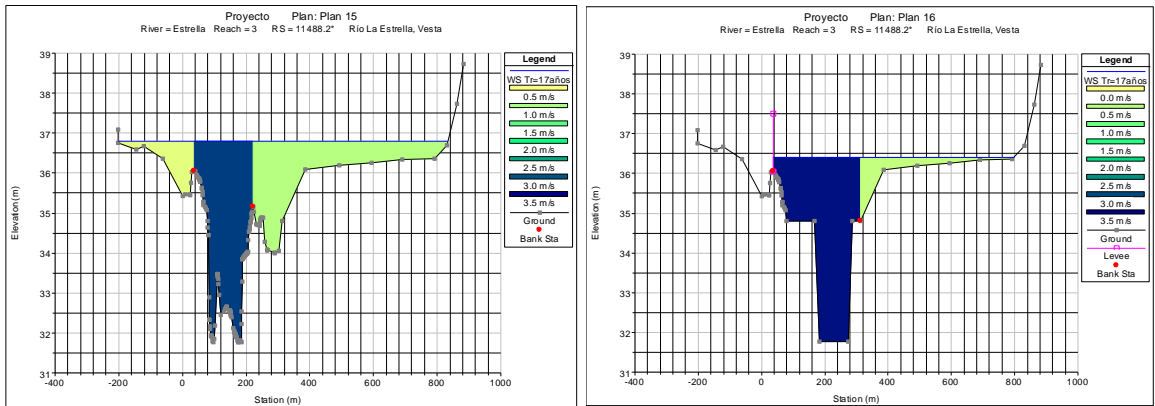


Figura 43. Modelación en la sección 11488,2 sin dique (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

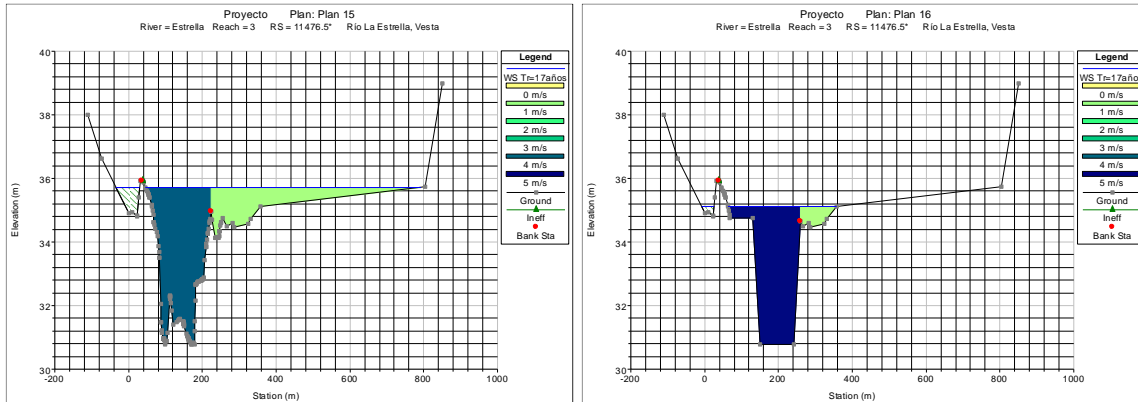


Figura 44. Modelación en la sección 11476,5 sin dique (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

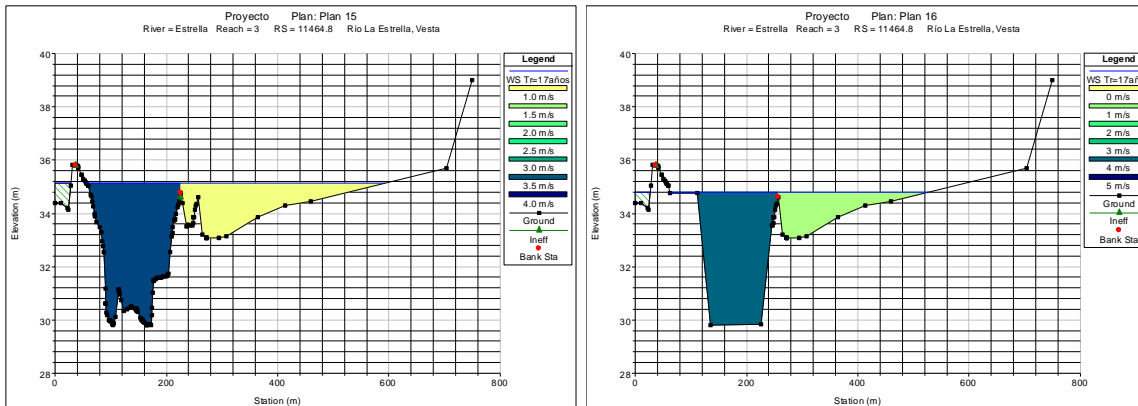


Figura 45. Modelación en la sección 11464,8 sin dique (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

Sección Crítica 5:

Cuadro 15. Medida de Prevención en el dique de Standard Fruit Company en Atalanta.

Sección	Estación	Elevación Recomendada (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)	Margen
7815,091	13,35153	23,6	22,6	1	Izquierda
7511,931	5,846309	23,12	22,12	1	Izquierda
7199,64	4,66	23,36	22,36	1	Izquierda
6973,397	2,74	23,37	22,37	1	Izquierda
6871,624	4,39	23,14	22,14	1	Izquierda
6512,613	7,68	22,75	21,42	1,33	Izquierda
6220,584	17,95	22,75	20,514	2,236	Izquierda
5863.63*	16,47	22,56	20,433	2,127	Izquierda
5506.68*	22,34	22,37	20,099	2,271	Izquierda

Sección	Estación	Elevación Recomendada (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)	Margen
5149.73*	28,21	22,19	19,764	2,426	Izquierda
7815,091	271,33	23,12	22,12	1	Derecha
7511,931	370,19	23,23	22,23	1	Derecha
7199,64	455,04	23,29	22,29	1	Derecha
6973,397	453,85	23,17	22,17	1	Derecha
6871,624	215,3214	22,75	21,53	1,22	Derecha
6512,613	252,46	22,75	21,73	1,02	Derecha
6220,584	253,62	22,75	21,69	1,06	Derecha
5863.63*	247,37	22,56	21,38	1,18	Derecha
5506.68*	243,42	22,37	21,14	1,23	Derecha
5149.73*	240,827	22,1	19,313	2,787	Derecha

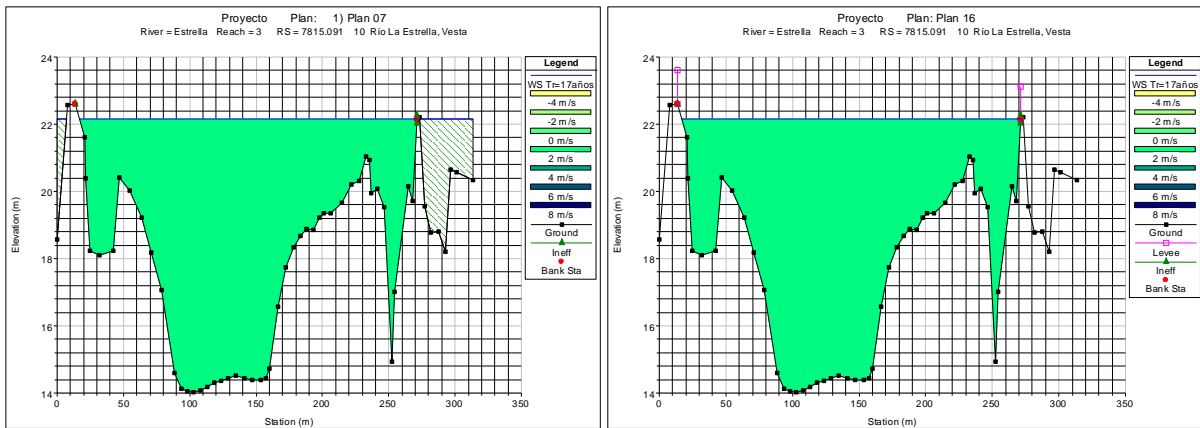


Figura 46. Modelación en la sección 7815,091 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

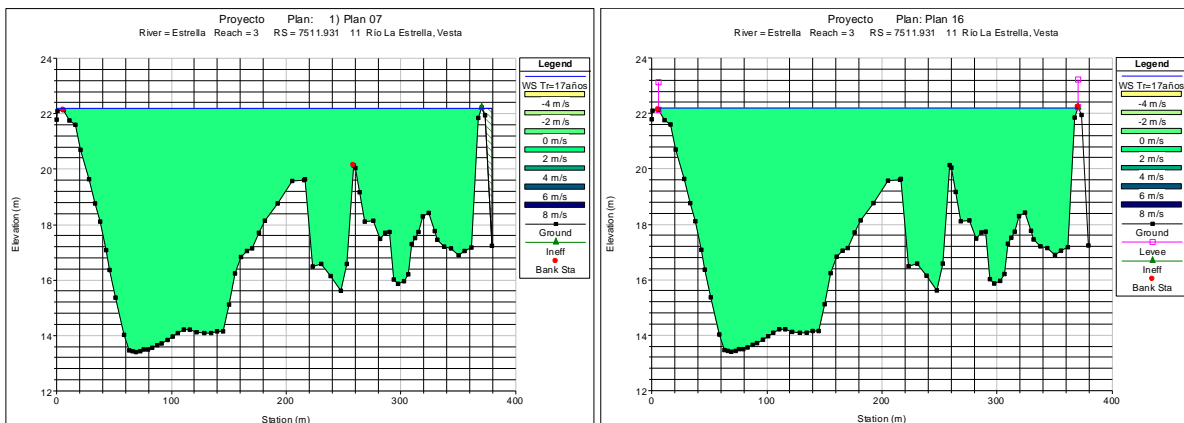


Figura 47. Modelación en la sección 7511,931 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

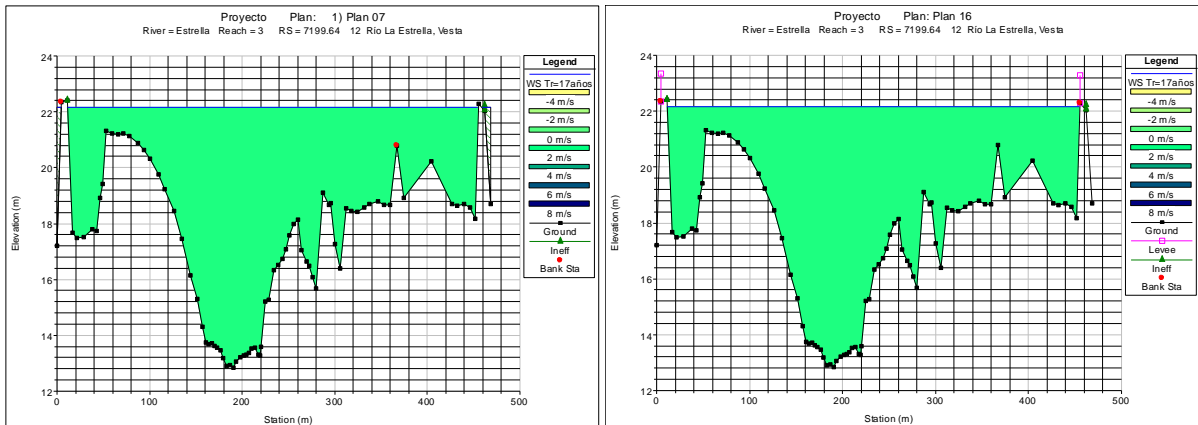


Figura 48. Modelación en la sección 7199,64 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

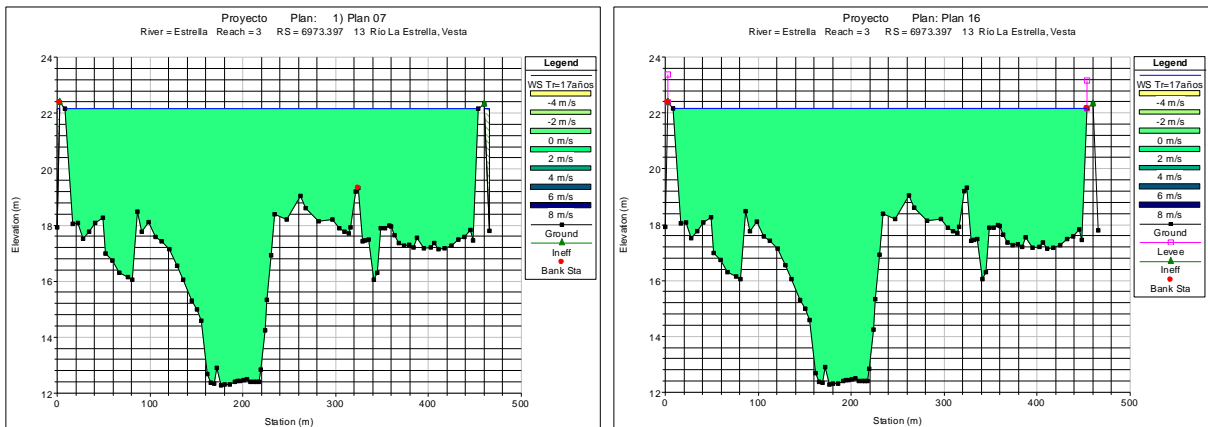


Figura 49. Modelación en la sección 6973,397 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

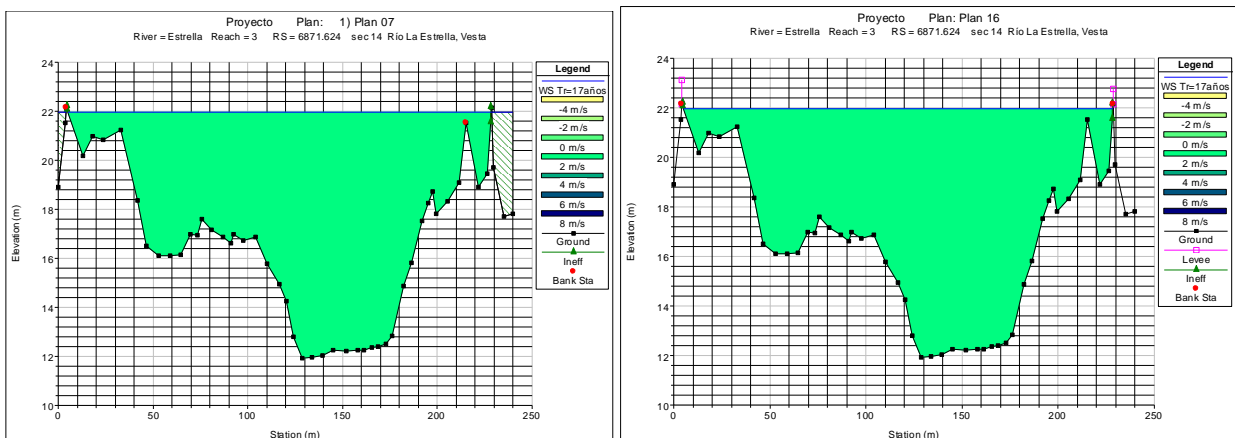


Figura 50. Modelación en la sección 6871,624 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

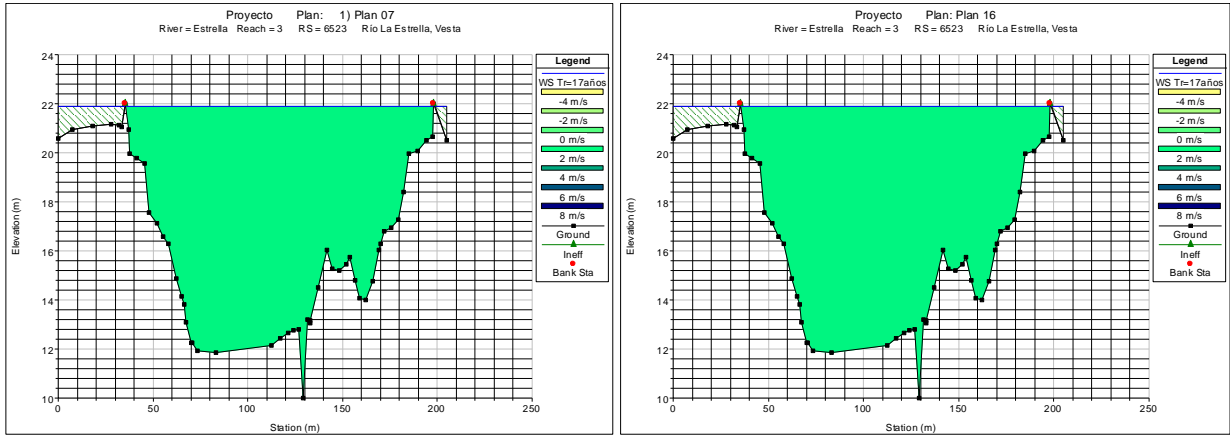


Figura 51. Modelación en la sección 6512,613 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

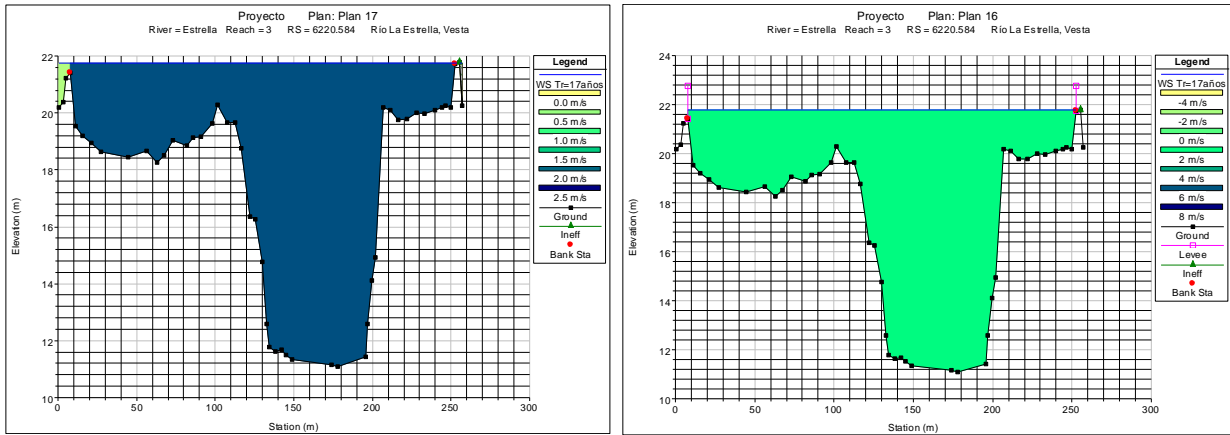


Figura 52. Modelación en la sección 6220,584 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

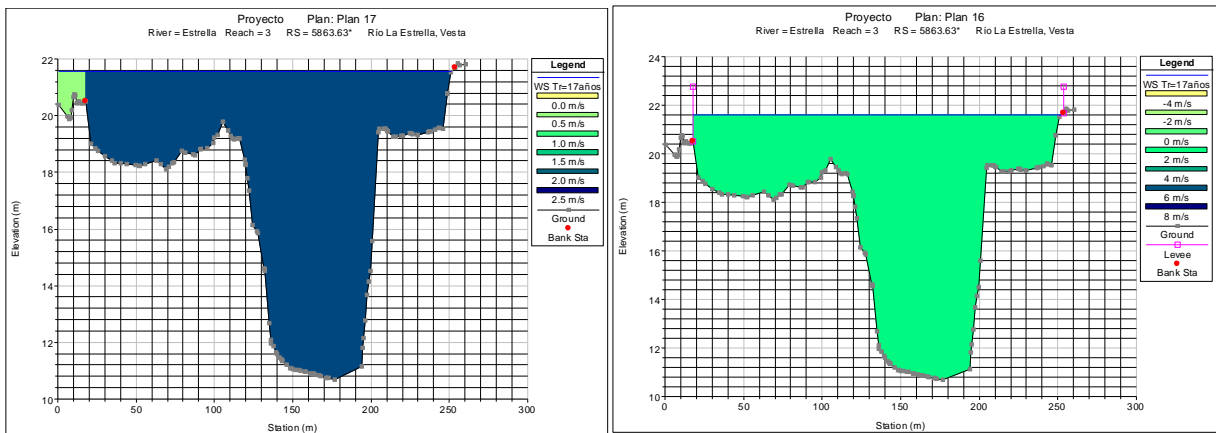


Figura 53. Modelación en la sección 5863,63 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

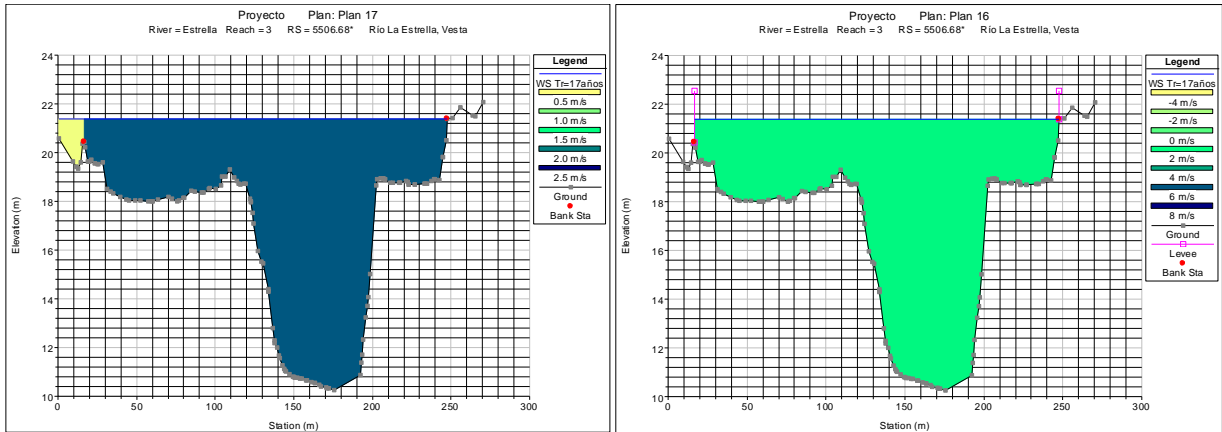


Figura 54. Modelación en la sección 5506,68 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

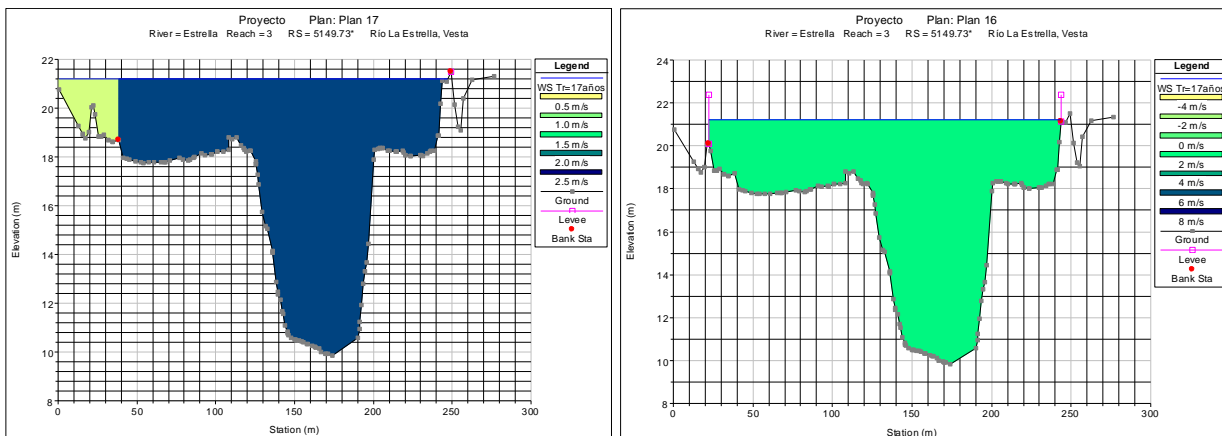


Figura 55. Modelación en la sección 5149,73 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

Sección Crítica 6:

Preventiva: Según los resultados de la modelación el nivel de agua para el caudal esperado para un periodo de retorno de 17 años es de 21.85 msnm en el puente ferroviario en Atalanta, igualando prácticamente el nivel del puente que es de 22.08 msnm.

Sección Crítica 7:

Preventiva: Según los resultados de la modelación el nivel de agua para el caudal esperado para un periodo de retorno de 17 años es de 18.12 msnm en el puente en Pandora, lo que representa una diferencia de un metro con respecto al puente que es de 19.20 msnm.

Sección Crítica 8:

No se tiene la suficiente información para establecer ubicación de la obra, ya que las secciones topográficas no cubren toda el área afectada. En fotografías aéreas, observaciones en sitio y los niveles obtenidos en la modelación hidráulica se observa que la línea de ferrocarril y algunas viviendas son vulnerables a inundaciones. Un punto crítico es el codo de 90 en donde la línea férrea se ubica sobre la margen del cauce.

Sección Crítica 9:

Extracción del material arrastrado por el Río Ñiñey depositado en la confluencia con el Río Estrella.

Sección Crítica 10:

Cuadro 16. Volúmenes totales producto de la recaba del Río La Estrella en el sector de Bonifacio.

River:	Estrella	Reach:	4						
RS		Area L	Area Ch	Area R	Area T	Volume L	Volume Ch	Volume R	Volume T
		(m ²)	(m ²)	(m ²)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)
5908,453	Cut	74	373	122	569	5732	72060	9947	87739
	Fill	0	0	0	0	0	0	0	0
	Net	74	373	122	569	5732	72060	9947	87739
5754.05*	Cut	1	560	7	568	39	83565	561	84165
	Fill	0	0	0	0	0	7058	0	7058
	Net	1	560	7	568	39	76507	561	77107
5599.66*	Cut	0	522	0	522	0	79925	0	79925
	Fill	0	91	0	91	0	30746	0	30746
	Net	0	431	0	431	0	49179	0	49179
5445,269	Cut	0	513	0	513	0	103361	0	103362
	Fill	0	307	0	307	0	44015	0	44015
	Net	0	206	0	206	0	59347	0	59347
5271,693	Cut	0	678	0	678	146	60187	3	60336
	Fill	0	200	0	200	0	13649	0	13650
	Net	0	478	0	478	145	46538	3	46686
5157,807	Cut	3	379	0	381	373	9182	23	9577

River:	Estrella	Reach:	4						
RS		Area L	Area Ch	Area R	Area T	Volume L	Volume Ch	Volume R	Volume T
	Fill	0	39	0	39	0	615	0	615
	Net	3	339	0	342	373	8567	23	8962
5133,901	Cut	29	389	2	420	2251	30615	146	33012
	Fill	0	12	0	12	0	947	0	947
	Net	29	377	2	408	2251	29668	146	32065
Total	Cut					8541	438895	10681	458117
	Fill					1	97030	1	97031
	Net					8541	341865	10680	361086

Cuadro 17. Dimensiones actuales y recomendadas para cada dique en el sector del puente de Bonifacio

Protección (Dique)	Margen Izquierda					Margen derecha				
	Río	Sección	Estación	Elevación Recom. (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)	Estación	Elevación Recom. (msnm)	Elevación actual (msnm)	Diferencia (m)
La Estrella, Bonifacio		6291.87*	27,04	7,00	4,11	2,89				
		6107,059	19,89	7,00	4,32	2,68				
		5908,453	17,98	7,00	2,95	4,05	196,65	7,00	4,42	2,58
		5754.05*					211,70	7,00	4,40	2,60
		5599.66*	50,16	7,00	4,63	2,29	250,80	7,00	4,94	2,06
		5445,269	59,87	6,80	4,71	2,88	292,38	6,80	4,68	2,12
		5271,693	69,74	6,80	3,92	2,88	292,38	6,80	4,68	2,12
		5157,807	99,09	6,50	5,50	1,00	272,70	6,50	4,32	2,18
		5140	Bridge							
		5133,901			8,23	-8,23	257,80	6,50	3,67	2,83
		4976.56*	61,6	6,50	5,71	0,79	247,66	6,50	3,68	2,82
		4819,219	51,91	6,00	3,13	2,87	198,98	6,00	4,16	1,84
		4654,734	48,43	6,00	2,87	3,13	191,16	6,00	1,76	4,24

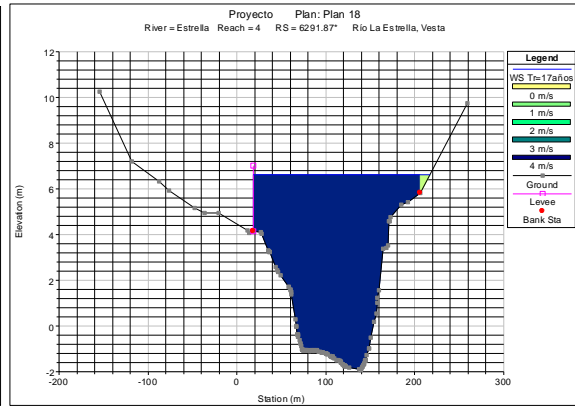
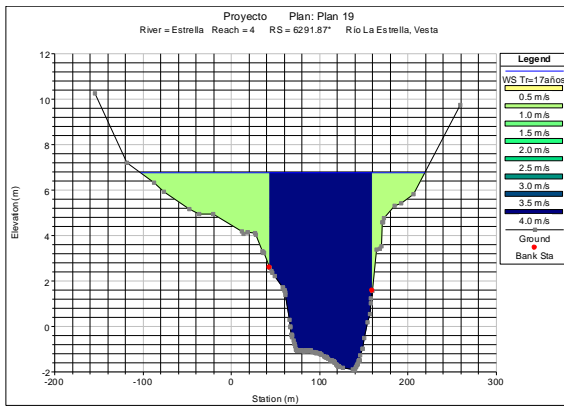


Figura 56. Modelación en la sección 6291,87 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

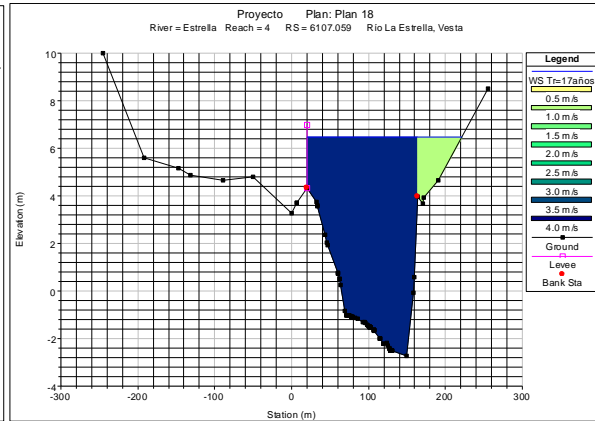
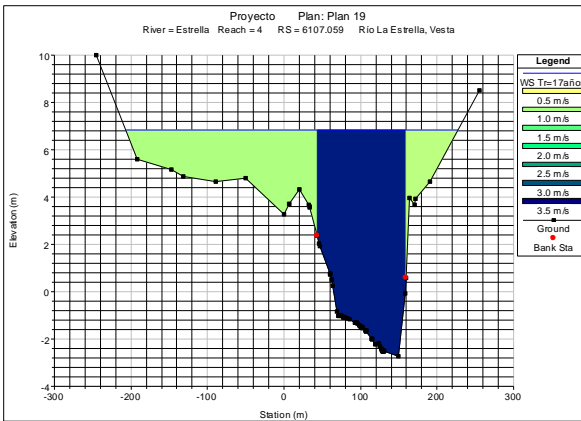


Figura 57. Modelación en la sección 6107,059 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

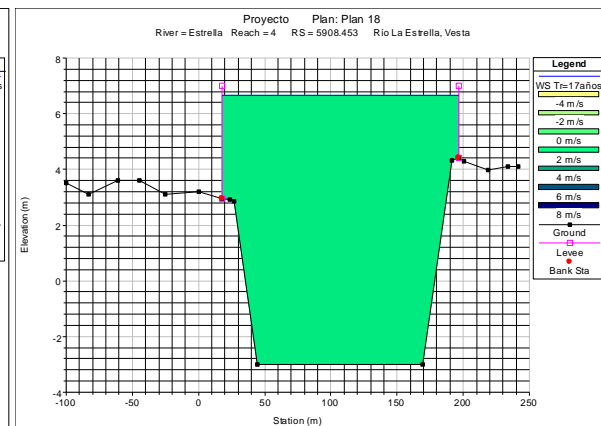
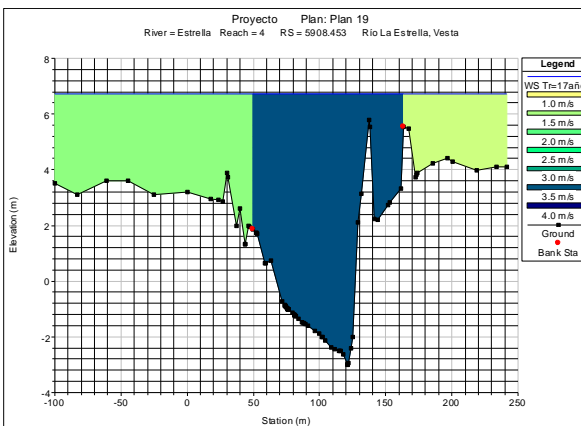


Figura 58. Modelación en la sección 5908,453 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

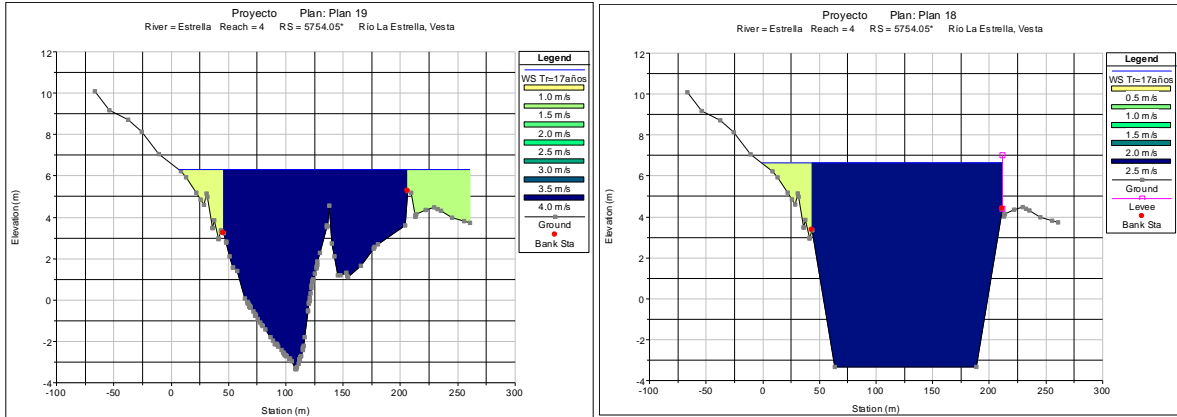


Figura 59. Modelación en la sección 5754,05 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

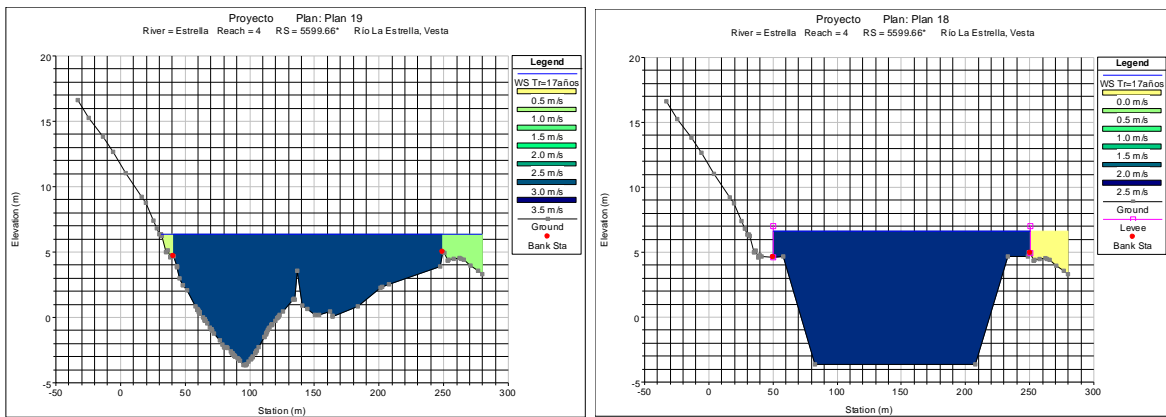


Figura 60. Modelación en la sección 5599,66 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

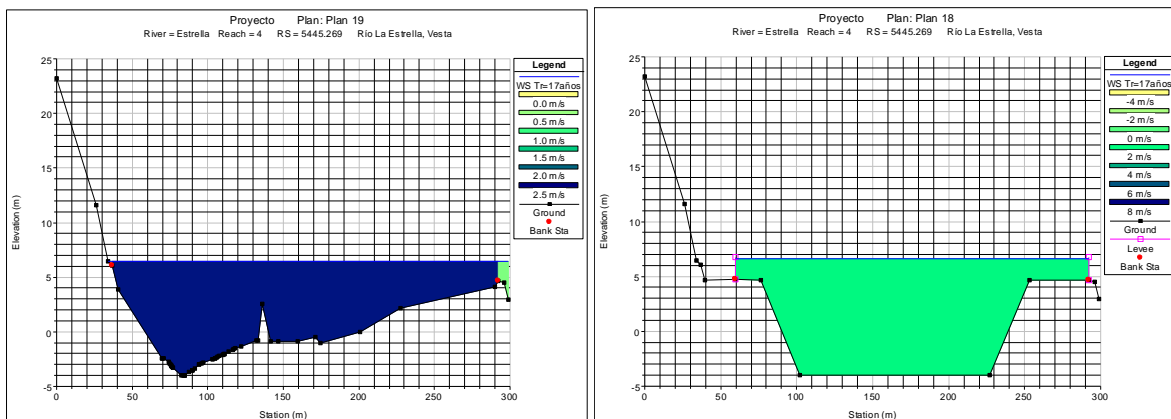


Figura 61. Modelación en la sección 5445,269 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

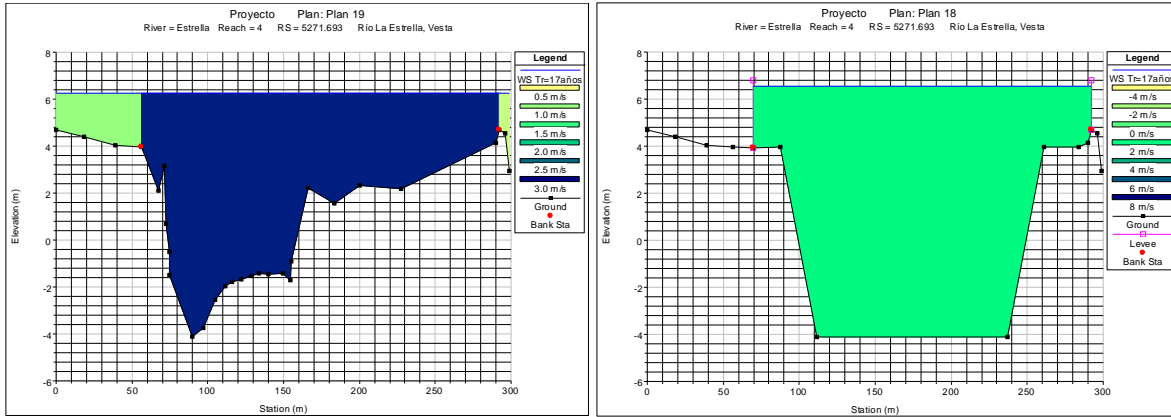


Figura 62. Modelación en la sección 5271,693 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

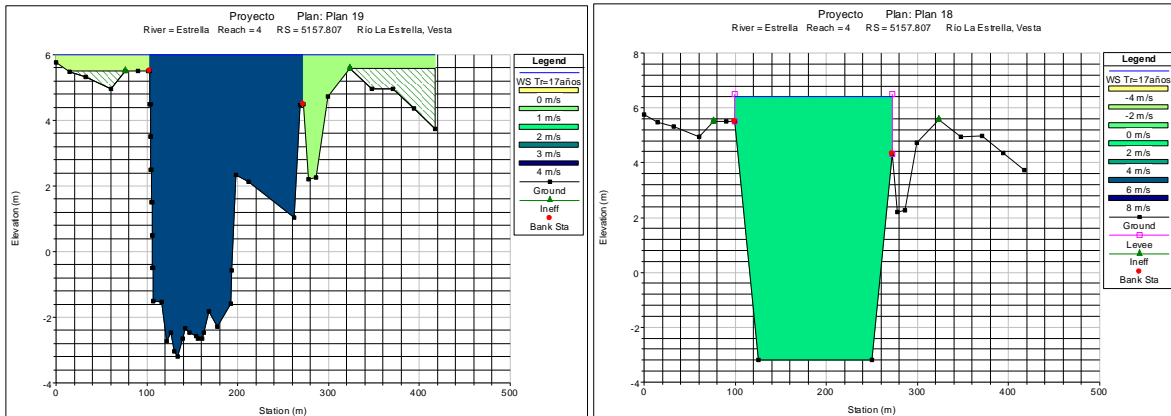


Figura 63. Modelación en la sección 5157,807 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

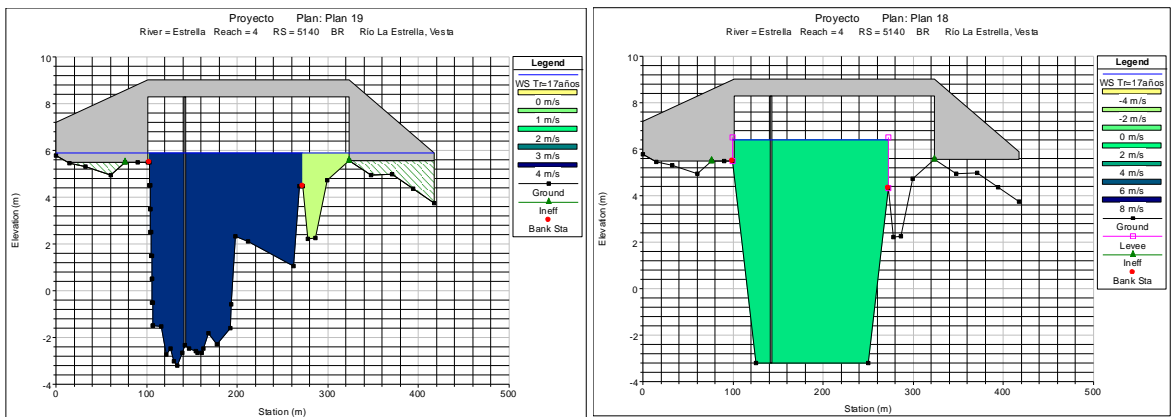


Figura 64. Modelación en la sección 5140 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

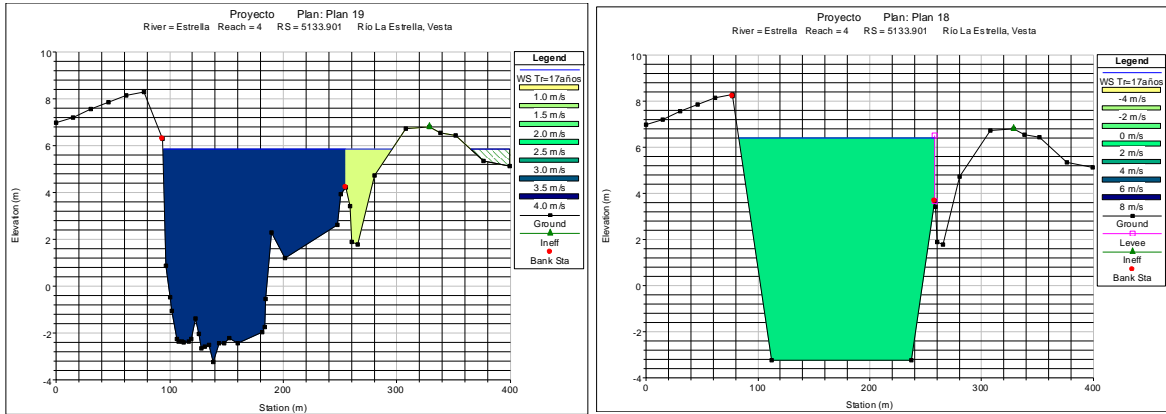


Figura 65. Modelación en la sección 5133,901 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

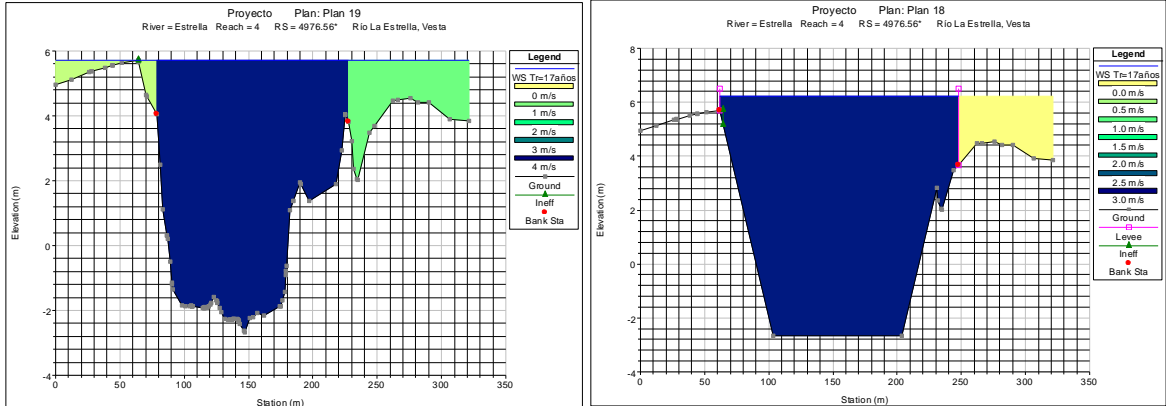


Figura 66. Modelación en la sección 4976,56 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

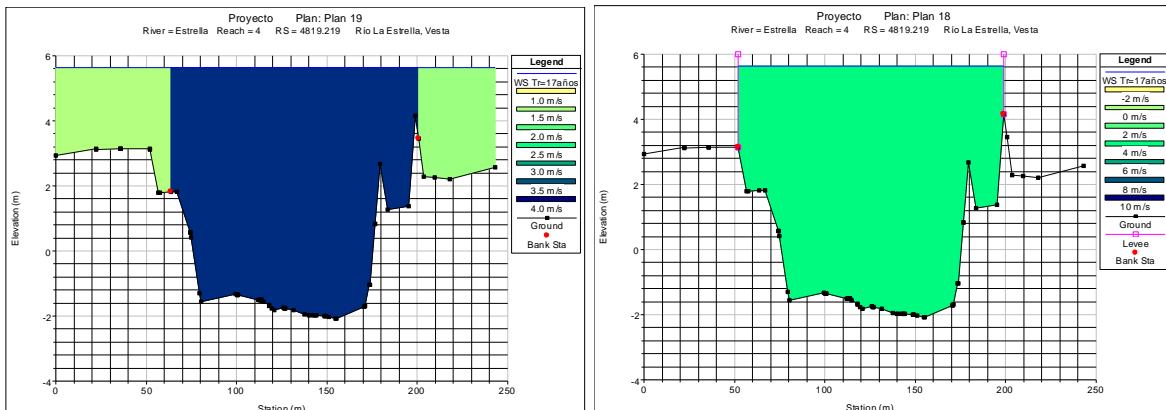


Figura 67. Modelación en la sección 4819,219 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

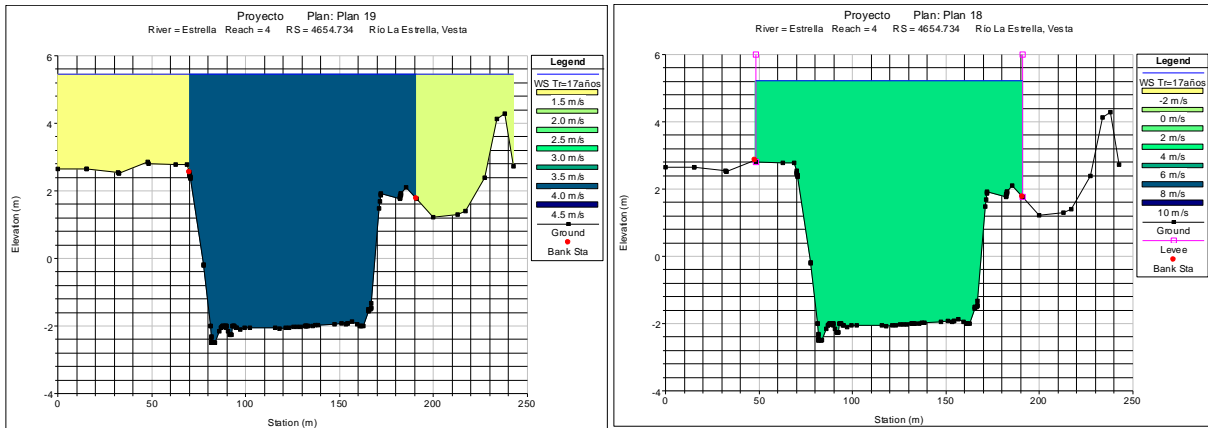


Figura 68. Modelación en la sección 4654,734 con dique actual (Izquierda) y con dique recomendado (Derecha)

5.2 Modelación en dos dimensiones

5.2.1 Manchas de Inundación

Los escenarios modelados con los programas Iber y Hec-Ras responden a crecidas calculadas para periodos de retorno de 1, 5, 10, 25 y 50 años. Los cuales son útiles para el diseño de obras, que según sus características responderán a una probabilidad de caudal de excedencia específica. Además, la cantidad de información que se puede extraer de los modelos realizados tiene un gran rango de acción; ordenamiento territorial, diseño y construcción de obras de defensa, extracción de materiales, generación de manchas de inundación, áreas de vulnerabilidad, manejo agrícola, sistemas de alerta temprana entre otros.

En el análisis comparativo de los resultados entre ambos modelos, se utilizaron los escenarios de crecidas para tiempos de retorno de 10 y 50 años.

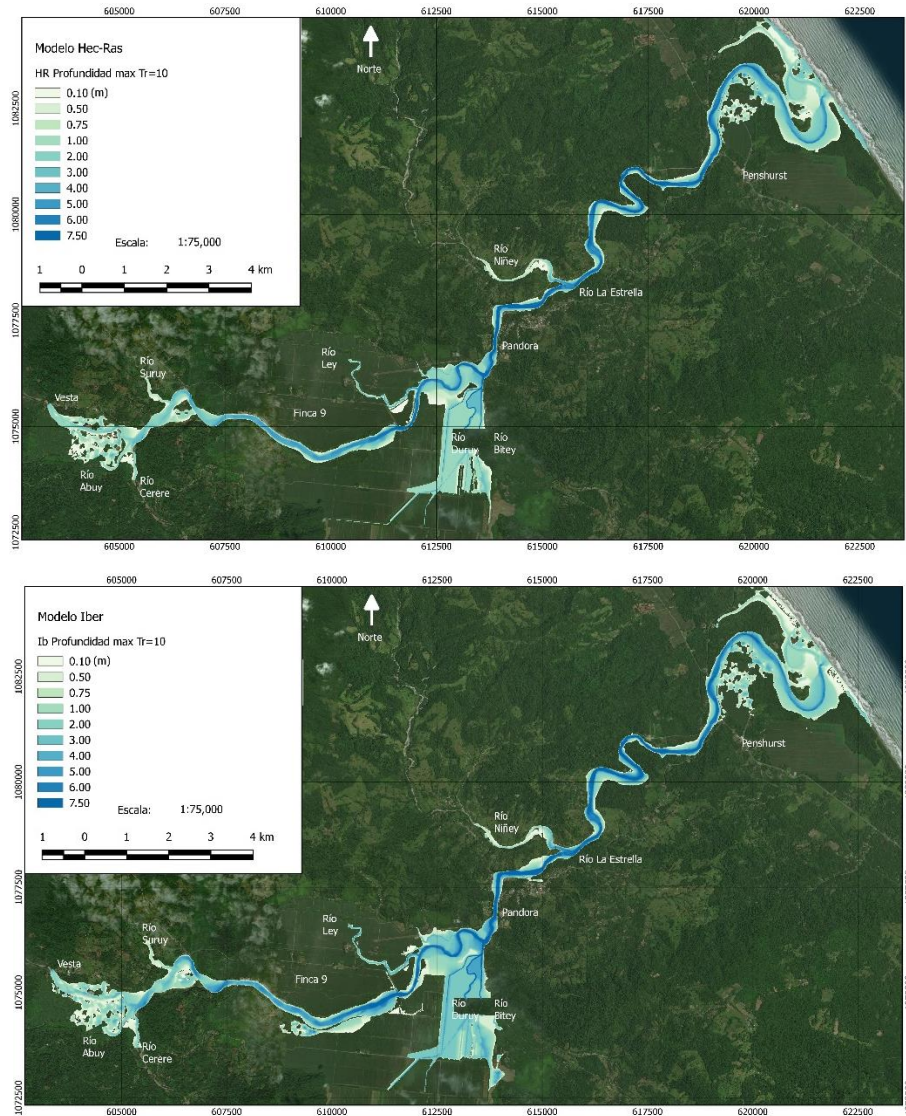


Figura 69. Profundidad máxima para un Tr=10 años

Al comparar el escenario de crecida para un Tr=10 años, en el caso de mancha máxima de inundación, visualmente se puede observar una similitud entre los modelos (Ver Figura 69). la modelación con el programa Hec-Ras determina un espejo de agua de 1300.12 ha, en tanto el modelo Iber estima un espejo de agua total de 1547.50 ha, lo que representa una diferencia del 16 %.

Sobre los calados obtenidos con Iber, tienen valores del rango de 0.1 a 12.47 m, con un promedio de profundidad de 2.64 m y una desviación estándar de 2.27 m, en tanto la modelación utilizando el programa Hec-Ras, tiene un rango de 0.001 a 11.68 m, un promedio de 2.34 m y una desviación estándar de 2.08 m. El modelo Iber en promedio calculo tirantes en 0.30 m (11.36%) mayores que los obtenidos con Hec-Ras.

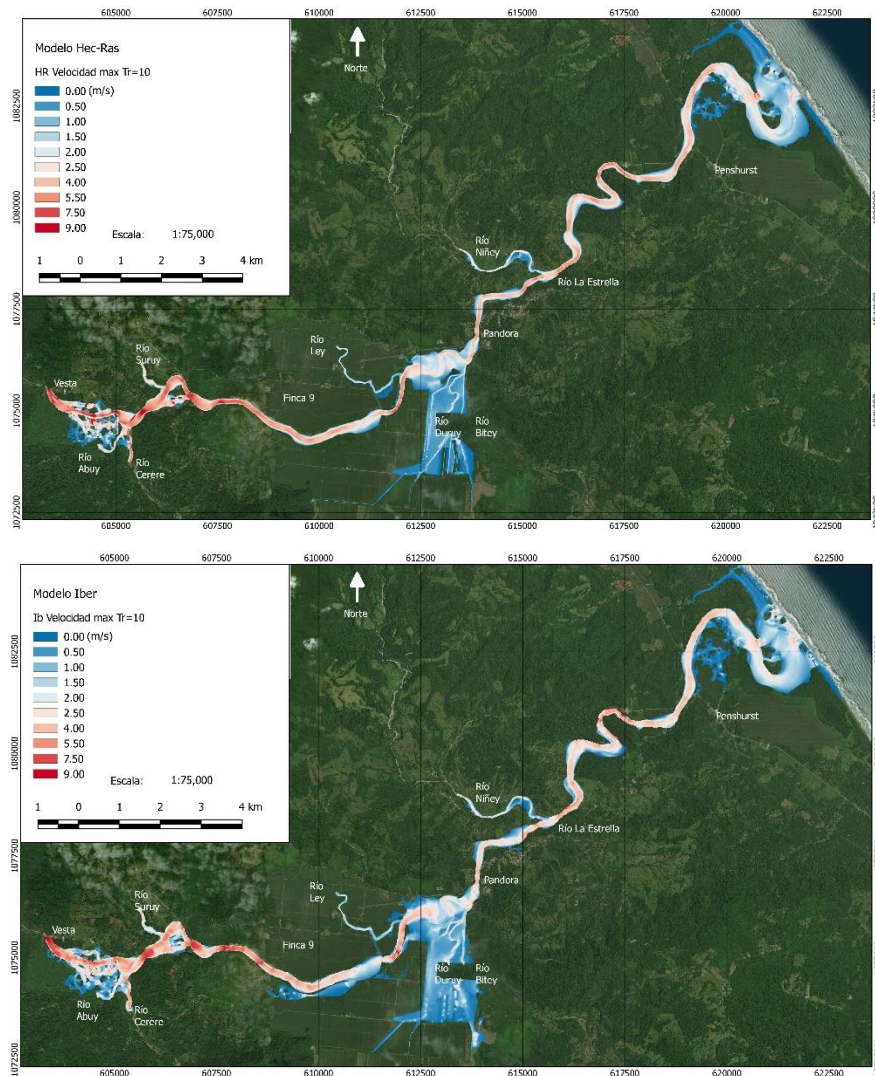


Figura 70. Velocidad máxima para un $T_r=10$ años

Sobre las velocidades de flujo obtenidas por ambos modelos bidimensionales, se determinó que las velocidades máximas se producen en la parte alta del trayecto modelado, entre Vesta y el inicio de Finca 9, efecto esperado, producto de una mayor pendiente. Este aspecto de la velocidad también tiene efectos sobre el arrastre de materiales y la granulometría que se puede observar a lo largo del trayecto y cuyo análisis se detalla más adelante.

La comparación de los resultados de velocidad entre ambos modelos, muestra coherencia con los datos de profundidades, ya que para un mismo caudal si la sección hidráulica es menor la velocidad debe de aumentar. El modelo IBER muestra una velocidad promedio

de 1.76 m/s, en un rango de velocidades de 0.00 – 21.00 m/s y una desviación estándar de 1.59. El modelo realizado con Hec-Ras obtuvo una velocidad promedio de 1.99 m/s, en un rango 0.00 a 27.50 m/s, con una desviación estándar de 1.78 m/s.

Al respecto, se debe aclarar que los datos de 21.00 y 27.50 m/s son anómalos que sobrepasan el cuartil 90 del rango de velocidad del flujo y que no tienen impacto en el promedio, dado que las áreas en donde se obtuvieron estos valores son muy pequeñas en comparación del área total.

En la comparación del escenario de crecida para un $T_r=50$ años, con el modelo Hec-Ras se obtuvo un espejo de agua total de 1614.63 ha, en tanto con el modelo IBER es de 1849.47 ha, lo que representa una diferencia del 12.70 %.

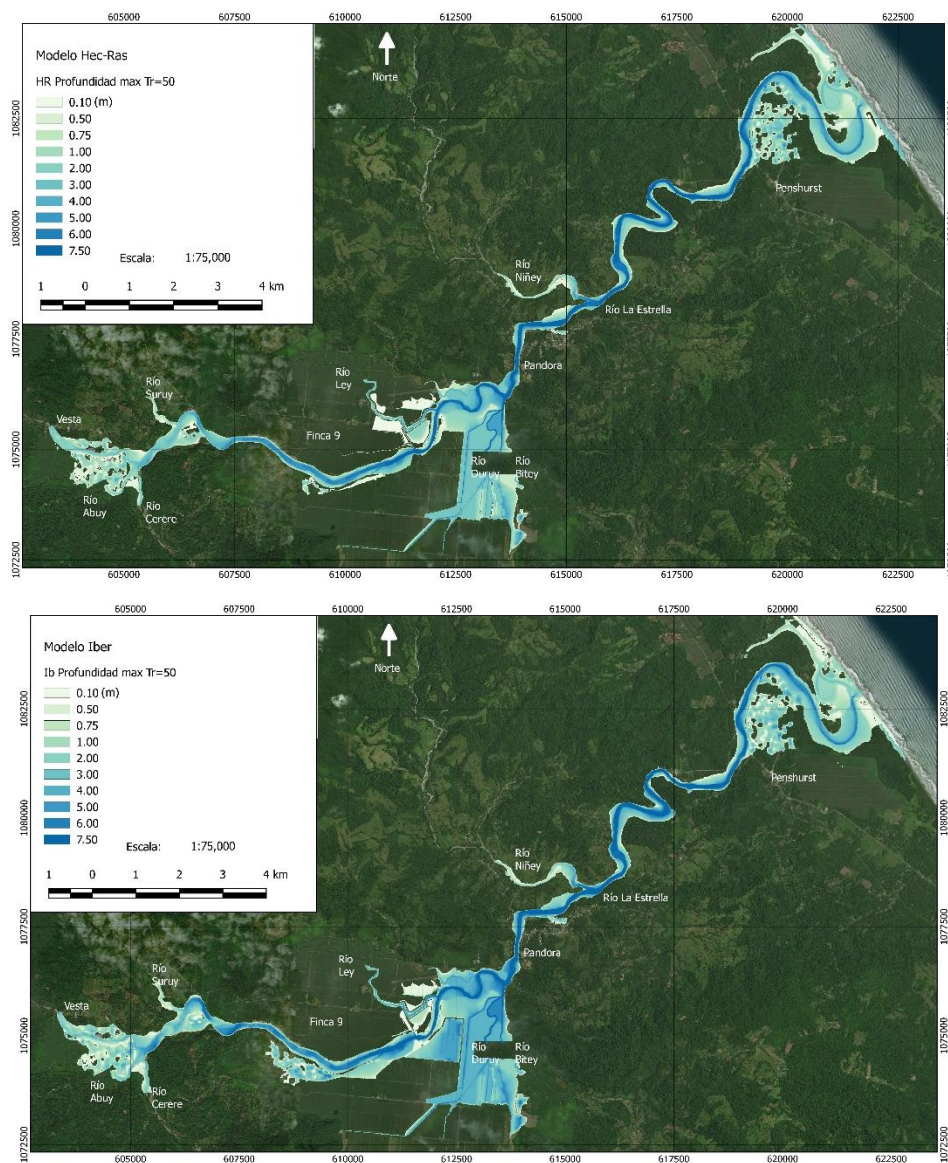


Figura 71. Profundidad máxima para un $T_r=50$ años

Los datos del modelo Hec-Ras para el escenario de $T_r=50$ años, muestra profundidades de 0 a 12.63 m, una profundidad promedio de 2.62 m y una desviación estándar de 2.23 m. El modelo Iber para el mismo escenario obtiene una profundidad promedio de 3.01 m, lo que representa una diferencia del 12.96 %.

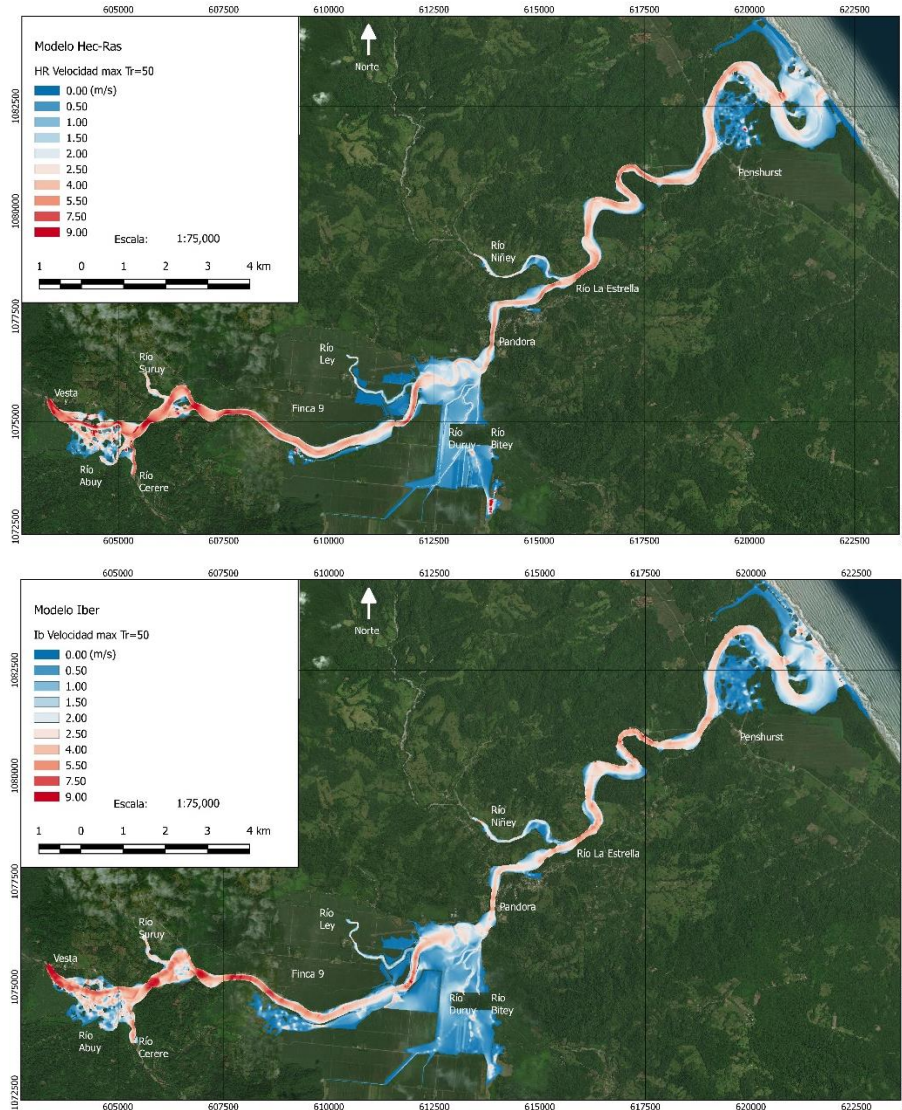


Figura 72. Velocidad máxima para un $T_r=50$ años

Respecto a las velocidades máximas obtenidas, se mantiene el comportamiento indicado en el escenario anterior, en donde los dos modelos muestran que las mayores velocidades se observan en el trayecto superior del Río La Estrella. El modelo Hec-Ras presenta rangos de velocidad de 0 a 29.10 m/s, una velocidad promedio de 2.08 m/s, y una desviación estándar de 1.97 m/s. El modelo Iber presentó un rango de 0 a 13.06 m/s, una media de 1.81 m/s y una desviación estándar de 1.70 m/s. Manteniendo la tendencia en la cual el

modelo Iber presenta los escenarios más críticos en cuanto a nivel de agua y desbordamiento.

Según se indicó en la metodología, ambos modelos son configurados con la misma información de topografía, cobertura, hidrógramas y condiciones de contorno. Siendo el factor que diferencia los modelos el tipo de mallado utilizado, tanto en forma como en dimensión. Por lo que se estima que esta variable genera las diferencias entre los modelos. Sin embargo, contemplando que son modelos con una génesis diferente, el Iber nace como un modelo 2D y el Hec-Ras 5.0.1 proviene de un proceso de transformación de un modelo unidimensional a uno en dos dimensiones y que incluso permite la mezcla entre 1D y 2D, es que se estima que los resultados alcanzados son relativamente razonables.

5.2.2 Análisis de trayectos vulnerables.

La comparación del modelo, mostró que los escenarios más críticos se generaron con el modelo Iber, por lo que para el análisis de las recomendaciones generales sobre obras de defensa se utilizaron los parámetros calculados con ese programa. Los puntos que según las visitas de campo y los resultados de la modelación muestran problemas de vulnerabilidad se muestran en la Figura 73.

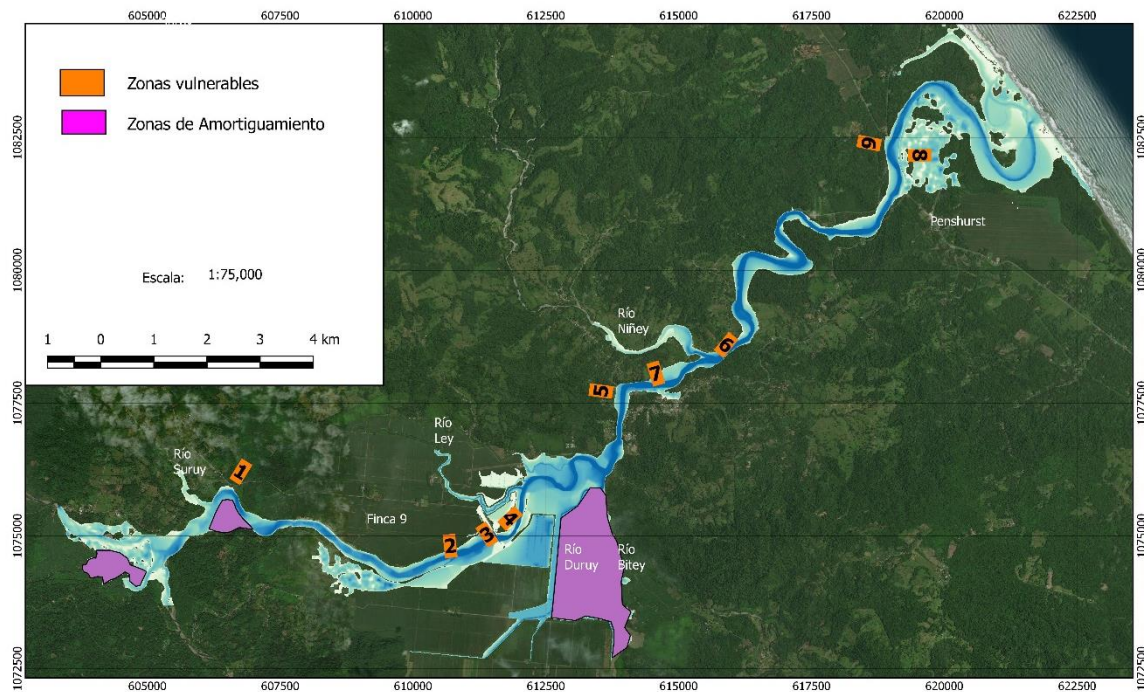


Figura 73. Zonas vulnerables a erosión o desbordamiento

Las áreas delimitadas como polígonos de color púrpura, se inundarán en caso de ocurrir el escenario planteado según el modelo bidimensional. Estas áreas representan 352 ha, siendo un área de amortiguamiento de gran importancia. Por lo que previo a realizar obras de defensa como diques, se deben realizar un análisis costo beneficio en donde se sopesa la importancia de mantener estas zonas de moderación.

El punto 1 se ubica en el sector denominado como Casa Amarilla, en este punto El Río La Estrella forma un meandro, que en su margen externa presenta un proceso erosivo, que pone en riesgo la ruta de acceso a Vesta, junto con algunas casas de habitación. En este punto se recomienda la realización de una estructura de protección, contemplando una velocidad máxima del flujo del rango de 3.00 a 5.50 m/s y tirantes entre 5.00 – 7.20 m sobre el lecho del cauce. Se recomienda no interferir el flujo de agua que se produce a lo interno del meandro, ya que este permite que el caudal no se concentre sobre el cauce principal. El caudal aliviado tiene un pico máximo de 1504 m³/s en tanto el caudal pico sobre el cauce principal es de 1957 m³/s, representando un 44 % del caudal pico del hidrograma total del Río La Estrella.

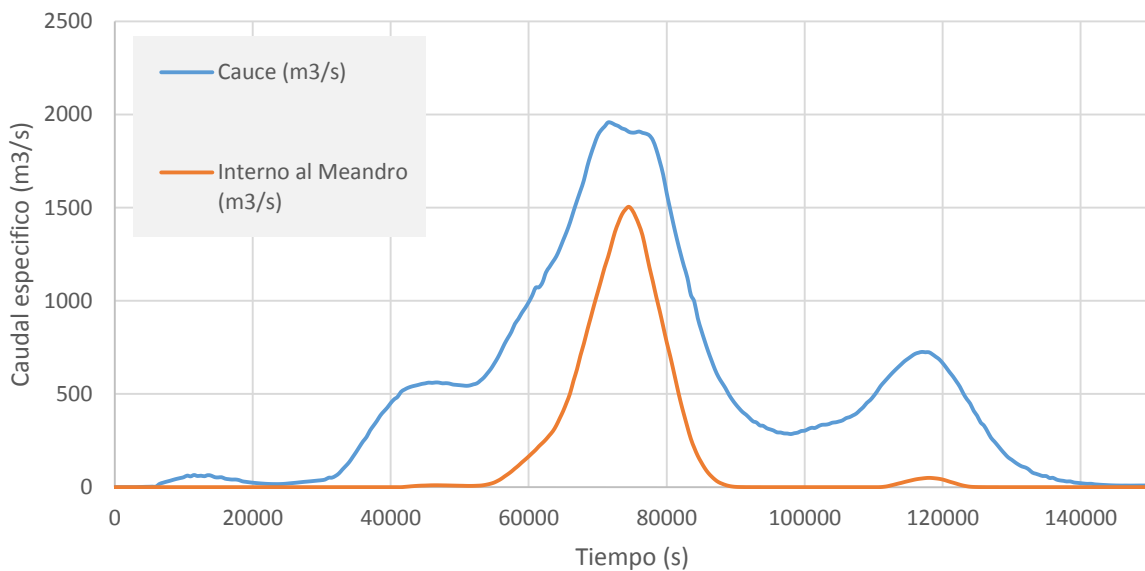


Figura 74. Hidrogramas cauce principal y flujo alterno al interior del meandro punto 1

En los puntos 2, 3 y 4 el nivel del agua supera el primer dique sobre margen derecha en Finca 9, sin embargo, previo a la recomendación de obras, se debe realizar un análisis

conjunto con los ingenieros de la compañía Chiquita Brands del modelo de elevación utilizado en la modelación.

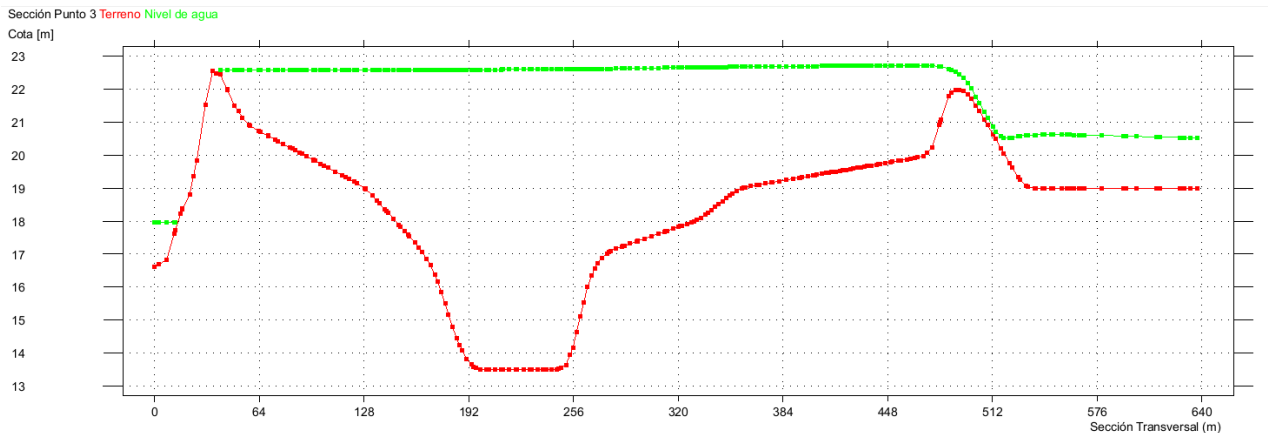


Figura 75. Nivel de agua alcanzado en el sector de dique de Finca 9.

En el punto 5, existen problemas de erosión de margen que pone en riesgo infraestructura férrea, las velocidades del flujo de agua del Río La Estrella tienen un rango de 3.60 a 4.2 m/s y tirante de agua máximo de 9.50 m.

En el punto 6, el río Niñey Arrastra material depositándolo sobre su desembocadura en el Río La Estrella, generando que el flujo de agua se concentre sobre la margen derecha. El balance del material sedimentado por el río Niñey y la capacidad del Río La Estrella para arrastrarlo, responde la componente la variabilidad espacial de las tormentas que suelen presentarse con mayor continuidad en las cercanías de las costas, lo que provoca la acumulación del material. La consideración al respecto, es un tema de costo beneficio, en donde se analice la urgencia y la necesidad real de remover este material por posibles problemas de desbordamiento o erosión de márgenes, y considerarlo como material aprovechable para reparación, mantenimiento y/o construcción de obras preventivas.

En 6, 9 y 8 se muestra el efecto de la marea para diferentes eventos consecutivos. En el punto 7 el modelo muestra una mancha de agua, cercano al Poblado de Guaria, dado que estas áreas responden a información satelital la información que se obtenga debe considerarse de carácter precautorio, por lo que se recomienda; se realice un análisis de vulnerabilidad y de la topografía del sitio, para determinar el requerimiento real del diseño de obras .

En el punto 8, se trata del desbordamiento del dique sobre la margen derecha del Río La Estrella, que protege un área agrícola destinada al cultivo de banano. El máximo nivel de agua alcanzado sobrepasa a el dique entre 0.30 a 1.00 m de elevación lo que se genera para un caudal pico de 3330 m³/s.

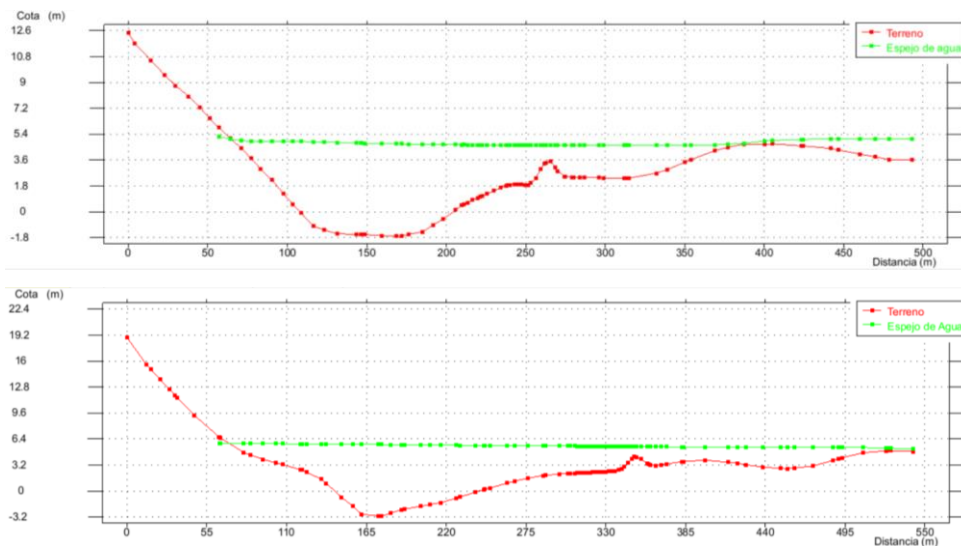


Figura 76. Secciones transversales Río La estrella Aguas arriba y aguas abajo del puente en Bonifacio.

Se debe considerar de forma integral las obras que se realicen para solventar la problemática del punto 9, ya que se trata de un mismo trayecto, solo que problemas en márgenes contrarias. Que además se ubican en una curva del Río La Estrella, el punto 8 en su margen interna y el punto 9 en la interna, lo que explica la dinámica de erosión y sedimentación.

En el punto 9, es el punto en donde se observan mayores factores de riesgo, ya que se involucra propiedad privada, caminos y vías férreas. Se extiende desde el puente en Bonifacio hasta 400 m aguas arriba, en donde existen problemas de erosión sobre la margen izquierda (margen externa del meandro). Las velocidades máximas calculadas rondan 2.75 m/s con tirantes máximos de 5.50 m.

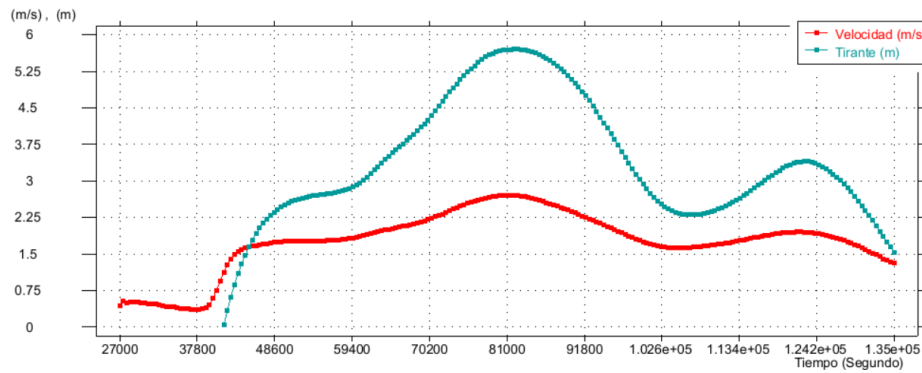


Figura 77. Evolución de la velocidad y tirante del flujo en el tiempo (Tr=50 años)

Se recomienda la construcción de una obra de protección sobre la margen derecha, que responda a las características de flujo y la geotecnia del sitio. Esto debe realizarse en paralelo con obras de recaba y aplicación de la sección hidráulica de tal forma que mantenga o aumente la capacidad hidráulica del trayecto en estudio. Se hace la salvedad que la topografía utilizada en el presente estudio es del 2014 y que pueden existir cambios respecto a las condiciones actuales.

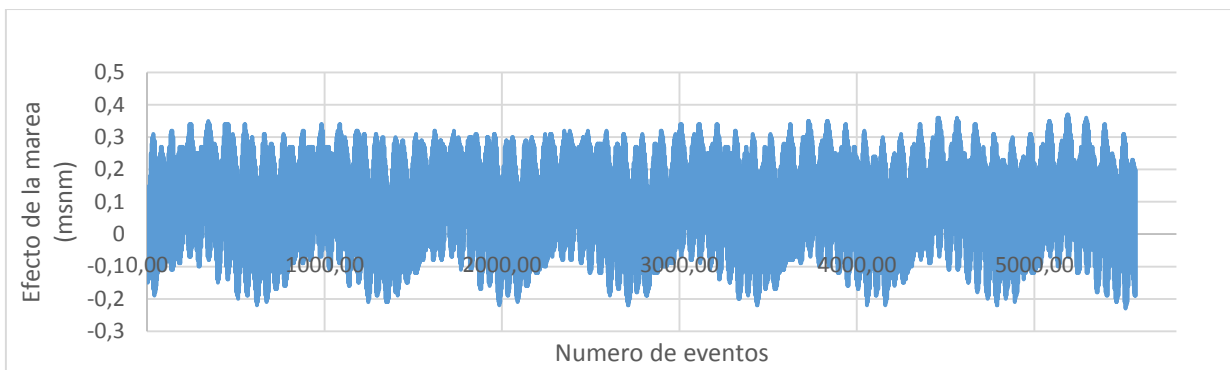


Figura 78. Efecto de la marea para diferentes eventos.

La máxima es de 0.37, media 0.05 msnm, el modelo utilizó 0.37

5.3 Transporte de sedimentos

La modelación tanto de sólidos en suspensión como de arrastre de fondo se modeló para escenarios de crecidas que responden a periodos de retorno de 1, 25 y 50 años. Además, dado que no se cuenta con datos de SS y QI de cada una las sub cuencas que conforma la Cuenca del Río La Estrella, se supuso que el comportamiento de los TSS en cada subcuenta tuvo la misma distribución obtenida en la ecuación $SS = 0.0006Q_t^{1.2059}$.

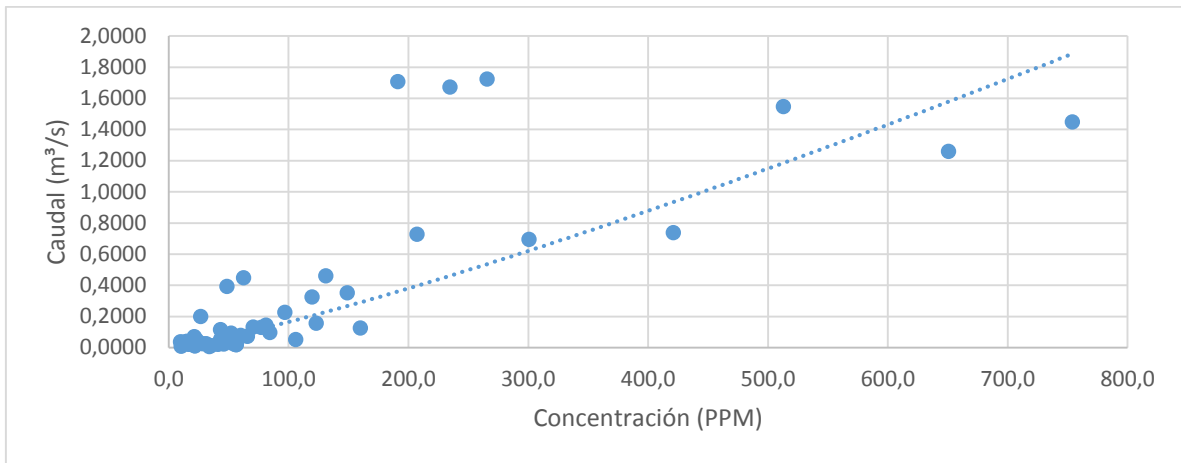


Figura 79. Transporte de sedimentos en suspensión

Por lo tanto, las entradas de sólidos en suspensión fueron dadas según la información que se muestran en la siguiente figura.

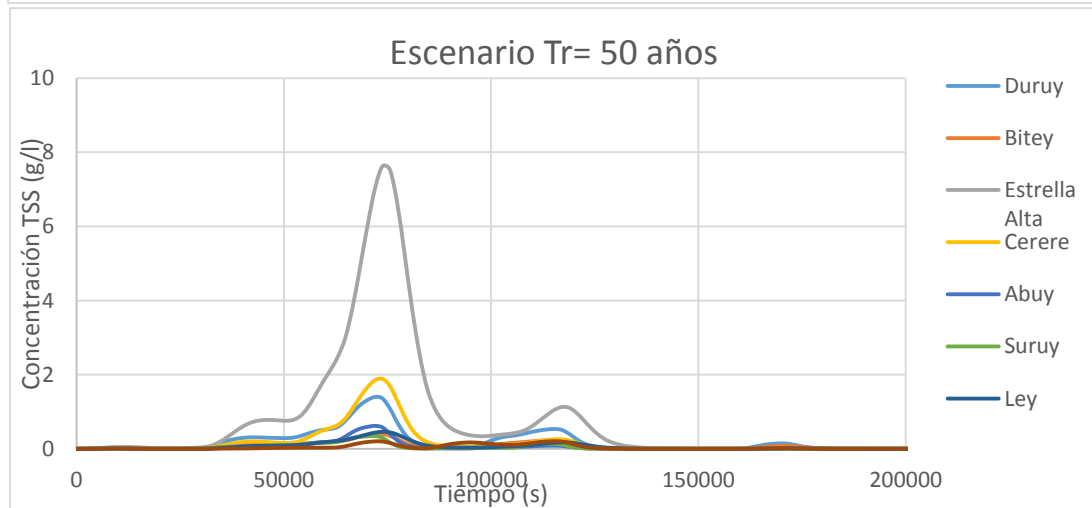
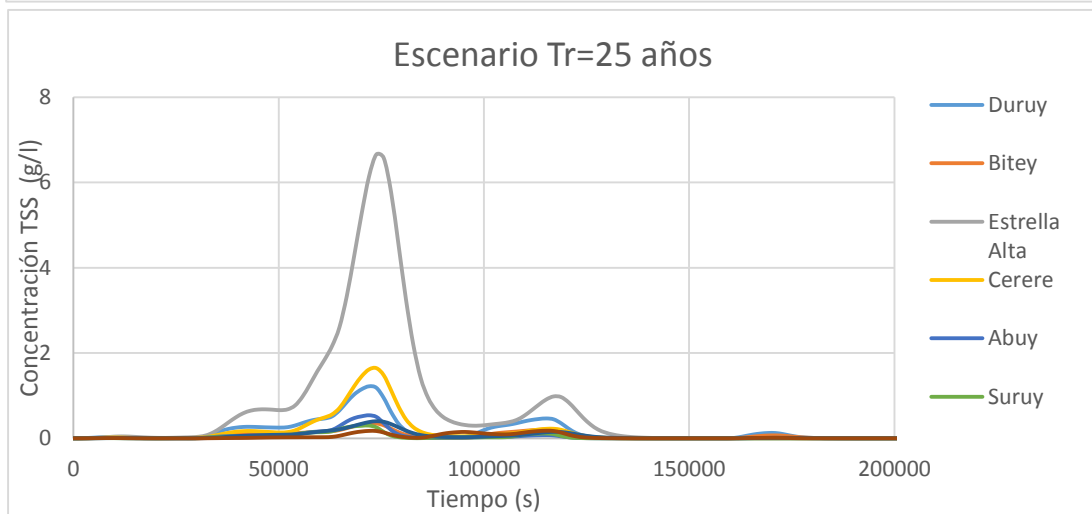
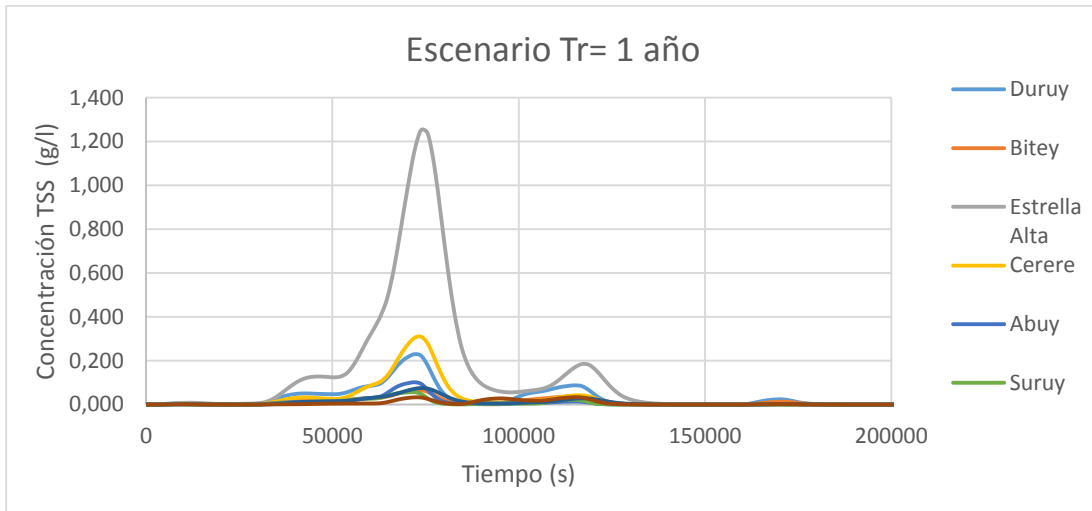


Figura 80. Concentración de TSS por sub cuenca para periodos de retorno de 1, 25 y 50 años.

5.3.1 Transporte de materiales de arrastre y en suspensión

De acuerdo al modelo Iber, el cual permite simular escenarios de transporte de sedimentos con un régimen de flujo variado, se utilizó, a manera de ejemplo, el escenario de crecida para un $T_r=25$ años, sin embargo, la modelación generada permite analizar muchos otros escenarios.

El análisis estadístico de la granulometría determinó que el $D_{50} = 0.047m$, que responde a las muestras tomadas en la parte alta del trayecto modelado, desde Vesta hasta la unión de Río La Estrella con el Río Suruy, con lo cual se propuso simular el movimiento de material de la parte alta y determinar hasta donde la corriente puede arrastrar el sedimento de fondo para el hidrograma propuesto ($T_r=25$ años).

Para el transporte de material en suspensión el diámetro de partícula utilizado es de 0.00005 m que representa el umbral entre limos y arcillas. Las concentraciones de sólidos en suspensión responden a las curvas antes mostradas, en las cuales la concentración está en función del caudal. Según la Figura 81, el caudal unitario de sólidos suspendidos (q_{ss}) aumenta de Vesta a Atalanta, lo que significa que los procesos de erosión y aportes de materiales de otras fuentes aumentaron el q_{ss} del Río la Estrella, por el contrario entre Atalanta –Pandora y Niñey se genera una disminución progresiva del q_{ss} , mostrando que en este trayecto los procesos de sedimentación de partículas con diámetros superiores a 0.00005 m (arenas) son mayores que los procesos erosivos.

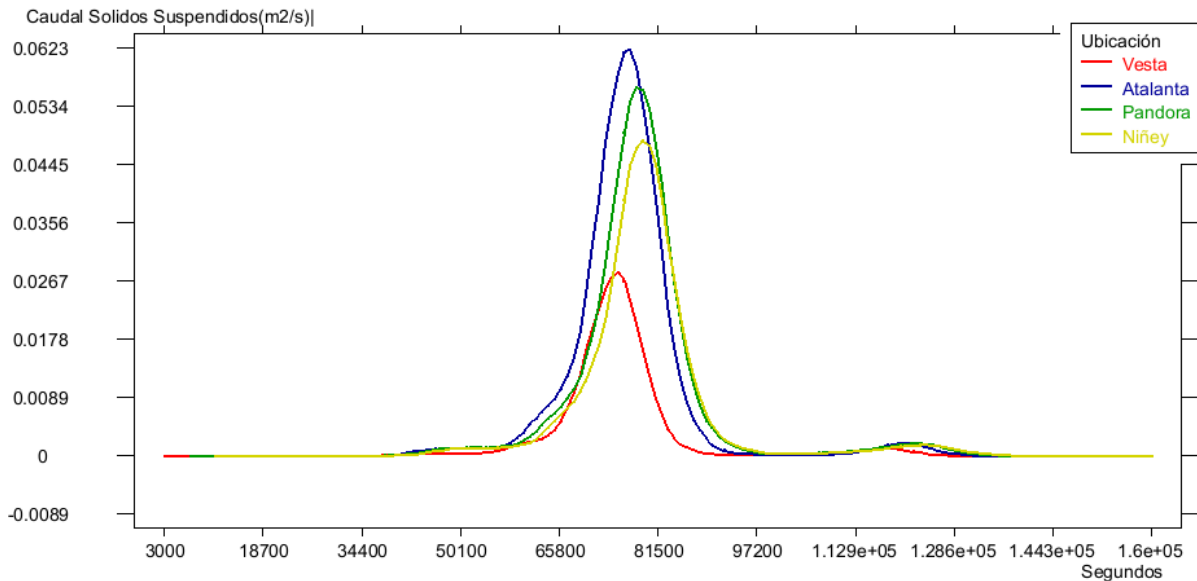


Figura 81. Comportamiento del caudal Sólido Suspendido.

Respecto al caudal sólido de fondo (q_{sf}), muestra una disminución de su capacidad de arrastre conforme disminuye la pendiente, ya que en Vesta muestra una gran capacidad de arrastre que progresivamente va disminuyendo entre Atalanta y Pandora. Al llegar a Niñey

aumenta muestra un ligero incremento, lo cual podría deberse al cambio de la pendiente o al empuje que pueda producir el flujo de este mismo afluente.

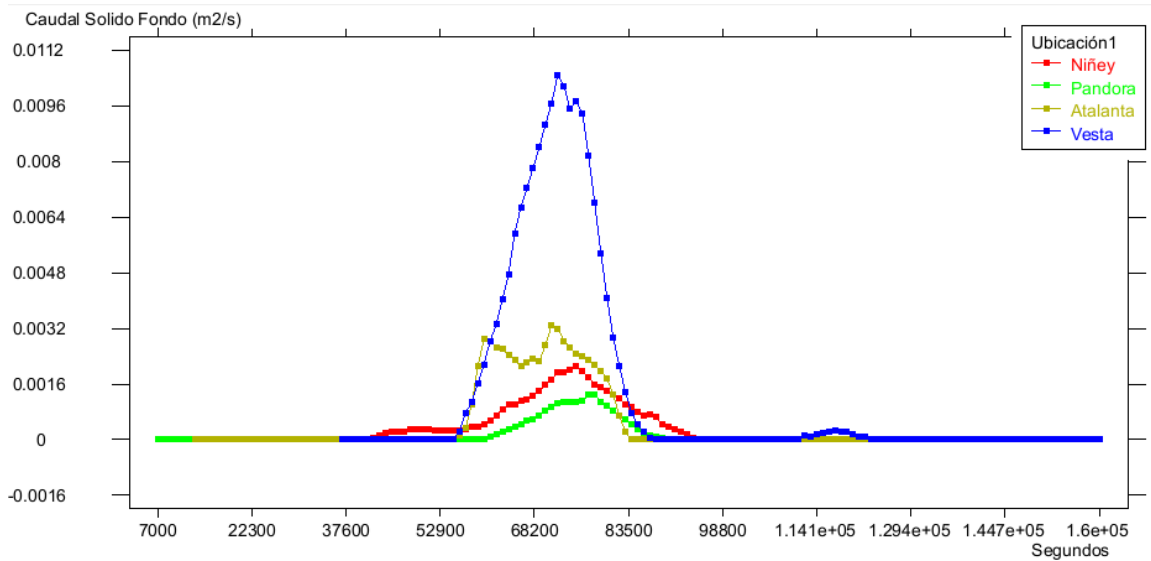


Figura 82. Comportamiento del caudal sólido de Fondo.

Los procesos de sedimentación y de erosión son dinámicos, tal como lo muestra la Figura 83, donde se puede observar las zonas de erosión en rojo y las de acumulación de material en azul. Este escenario se da para los diámetros propuestos tanto de sólidos suspendidos como de fondo.

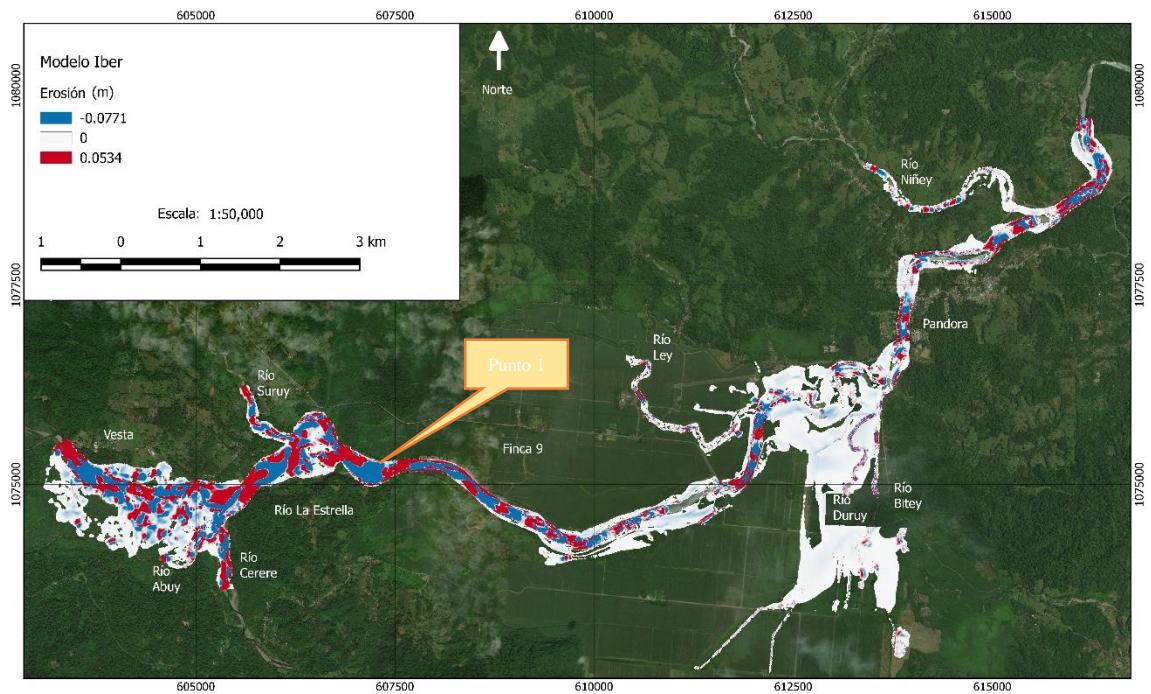


Figura 83. Erosión máxima

Es importante señalar que la Figura 84 muestra el valor de erosión máxima, pero este valor es fluctuante a lo largo de la duración del evento y en mucho depende del hidrograma de la crecida. En el punto 1, se pueden observar ambos procesos: sedimentación y erosión, lo que se aprecia mejor en la Figura 83.

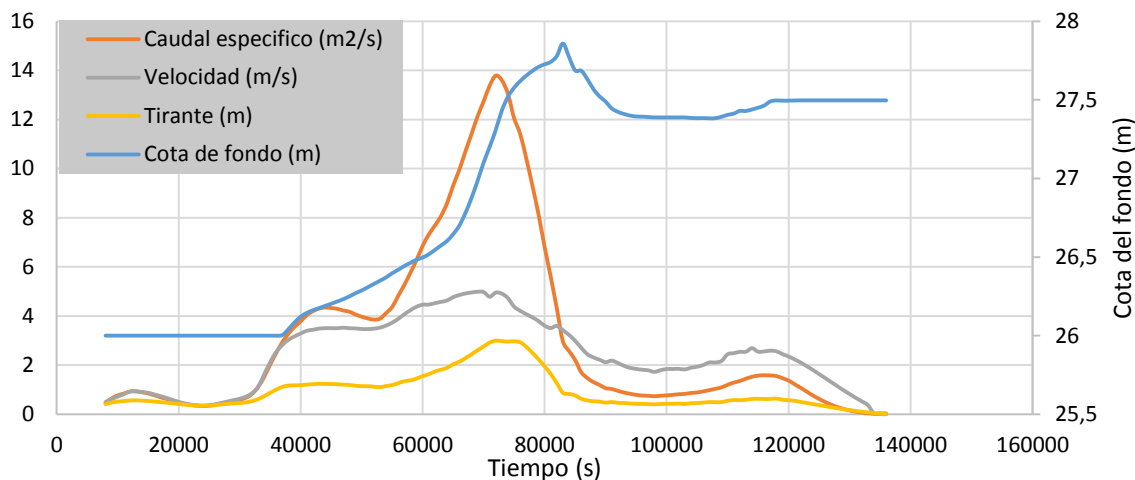


Figura 84. Evolución del fondo del cauce en el punto 1 durante el evento.

VI. Conclusiones y recomendaciones

Del acontecimiento de inundaciones en el Río La Estrella se tienen antecedentes desde la década de 1960, contabilizándose según la CNE siete eventos entre 1960 y 1990 que afectaron las poblaciones del Valle de La Estrella. La problemática de inundaciones se incrementó a partir del terremoto de 1991, el cual generó una serie de transformaciones geomorfológicas de la cuenca que iniciaron una continua transformación del fondo del cauce, debido principalmente al arrastre y deposición de sedimentos que viajan desde las partes montañosas. Esta situación, aunado al cambio en el régimen de las lluvias ha generado una mayor frecuencia y magnitud de eventos extremos en la planicie de inundación de la cuenca. Esto ha provocado una mayor vulnerabilidad para la actividad socioeconómica y para las diversas estructuras civiles e hidráulicas presentes, afectando tanto producción agrícola, asentamientos, caminos, ferrocarril y puentes.

La calibración del modelo se realizó bajo las condiciones de información de topografía suministrada por ambas tanto por CORBANA como por Standard Fruit Company. Esto implicó generar secciones transversales interpoladas en un tramo importante en el Valle de La Estrella, sin embargo, la validez de los resultados de la modelación se realizó de acuerdo a la información histórica registrada y a entrevistas de campo.

A pesar de que el coeficiente de rugosidad (n-manning) se obtuvo por medio de la observación de campo, se logró un modelo adecuado, el cual es mejorable aplicando

técnicas para calcular coeficientes de rugosidad a partir de datos medidos en campo. Otro aspecto a mejorar es aumentar el número de secciones transversales entre los puentes de Atalanta y Pandora, dado que el modelo solo cuenta con dos secciones en un trayecto con una longitud aproximada de 3800 metros.

El afluente Suruy cuenta con diques en algunos trayectos del cauce en ambas márgenes, impidiendo el desbordamiento en crecidas ordinarias. El material de arrastre depositado en su confluencia con el Río La Estrella es grueso con rocas de diámetros máximos de 50 cm, lo cual no presenta un problema para el cauce principal ya que el Río La Estrella en este punto es capaz de mover rocas con diámetros máximos de 1.5 metros.

El Río Cerere también tiene obras de protección como diques y mejoras de sección, respecto al arrastre de materiales tiene un comportamiento similar al del Río Suruy, lo cual se puede observar in situ al comparar el nivel del fondo del cauce del Cerere con el del Río La Estrella, ya que el fondo de la corriente principal está alrededor de 1.00 metro por debajo, lo que muestra que el material aportado por el Río Cerere es fácilmente movilizadado y redistribuido por el Río La Estrella.

El afluente Niñey presenta un arrastre de sedimentos importante el cual se deposita en el cauce principal. Esto genera una isla de sedimentos en la confluencia de ambos (afluente y cauce principal) reduciendo la capacidad hidráulica del cauce principal y variando la dirección normal del flujo.

El Río La Estrella mantiene un régimen muy dinámico de flujo, con cursos de agua serpenteadas (meandros) debido a las bajas pendientes presentes en la parte baja de la cuenca y con deposición de sedimentos en las partes convexas del meandro y erosión de bancos en las partes cóncavas. Esto sugiere un análisis de flujo en dos dimensiones con el fin de entender mejor la dinámica del flujo y su impacto en las obras recomendadas.

El estudio ha propuesto una serie de obras de infraestructura en zonas vulnerables por su importancia económica y humana. Sin embargo, estas sugerencias deben de considerarse dentro de un marco de costo/beneficio, ya que se debe de valorar la conveniencia de construir obras o de trasladar la actividad o población a zonas menos vulnerables.

Los modelos en dos dimensiones (HEC-RAS e IBER) utilizados para obtener escenarios en periodos de retorno de 10 y 50 años, permitieron identificar 9 puntos de riesgo de inundación, resultados que se complementaron con la modelación de transporte de sedimentos, donde se logró visualizar puntos de erosión y deposición de material y que eventualmente podrían estar ocasionando condiciones para intensificar los efectos de las crecidas.

Los resultados obtenidos constituyen una muestra de la amplia gama de escenarios que se pueden lograr con el modelo obtenido; entre otros, se pueden generar corridas de la modelación para diferentes caudales según periodos de retorno, se pueden visualizar

velocidades de flujo, profundidades, puntos de desbordamiento, puntos de erosión, puntos de deposición de material sedimentado, combinación de diferentes variables, modelación de obras hidráulicas así como caudales provenientes de proyecciones de cambio climático. El modelo será entregado bajo convenio a la CNE para su utilización en la prevención y atención de desastres como parte del programa de actualización del mapa de inundaciones de Costa Rica gestionado por esa entidad.

VII. Referencias Bibliográficas

Ahmad, S; Simonovic, S. 2006. An intelligent decision support system for management of floods. *Water Resources Mangement* 20: 391-410.

Artelia; BAW (BundesAnstalt fuer Wasserbau); (CETMEF) Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales; Daresbury Laboratory; EDF (Electricité de France R&D); HR Wallingford. 2013. Open TELEMAC-MASCARET. Consultado 20 abril 2013. Disponible en <http://www.opentelemac.org/>

BCE (Bjoersen Beratende Ingenieure). 2013. Kalypso 1D/2D. Consultado 20 abril 2013. Disponible en <http://kalypso.bjoernsen.de/index.php?id=334&L=1>

BMT-WBM. 2007. TUFLOW Flood and Coastal Simulation Software. Consultado 20 abril 2013. Disponible en <http://www.tuflow.com/>

Bruce, P; Casasola, R. 2005. Diagnóstico de Inundaciones Valle La Estrella. En *Diagnostico Inundaciones Valle La Estrella*. Costa Rica. pp 60.

Castro Díaz, M.J; Fernández-Nieto, E.D; Ferreriro, A.M. 2008. Sediment transport models in Shallow Water equations and numerical approach by high order finite volume methods. *Computers & Fluids* 37: 299-316.

Chow, V. T. 1994. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana. 299 p.

Colorado State University. 2005. Accuracy of the Hec-Ras to calculate flow depths and total energy loss with and without bendway weirs in a meander bend. Consultado 19 abril 2013. Disponible en <http://www.usbr.gov/uc/albuq/envdocs/techreports/flowDepthReport/flowDepthMeander.pdf>

Crossley, A. 1999. Accurate and efficient numerical solutions for the Saint Venant equations of open channel flow. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham. United Kingdom.

DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst). 2006. Flood Manager E-learning. Consultado 20 abril 2013. Disponible en <http://daad.wb.tu-harburg.de/homepage/>

DHI Water & Environment. 2004. MIKE 11 Sediment Transport. Consultado 19 abril 2013. Disponible en: <http://www.dhisoftware.com/Download/MIKEByDHI2011.aspx>

Fleenor, W; Jensen, M. 2003. Evaluation of numerical models Hec-Ras and DHI-MIKE 11. Draft submitted to Journal of Hydraulic Engineering Nov. 2003. Consultado 19 abril 2013. Disponible en http://www.water.ca.gov/floodsafe/fessro/docs/north_HECRAS_Mike11.pdf

Flumen (Instituto Flumen, Universidad de Catalunya) 2016. IBER, versión 2.4.3 Consultado: 19 abril 2016. Disponible en: <http://iberaula.es/web/index.php>

Gee, M; Brunner, G. 2005. Dam break flood routing using Hec-Ras and NWS-FLDWAV. Impacts of global climate change. Proceedings World Water and Environmental Resources Congress, Alaska United States.

Horrit, M.S; Bates, P.D. 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of Hydrology 268 (1-4): 87-99

ICE (Institutot Costarricense de Electricidad). 2012. Proyecto hidroeléctrico Reventazón: estudios ambientales adicionales. Parte C: Estudio de sedimentos. Consultado 23 abril 2013. Disponible en <http://www1.ifc.org/wps/wcm/connect/ecdcf2804a89a0669793fff998895a12/Parte+C+-+Estudio+de+sedimentos.pdf?MOD=AJPERES>

Jovanovic, M; Pasche, E; Toepfel, M; Donner, M. 2006. 1-D Hydraulic. Consultado 20 abril 2013. Disponible en http://daad.wb.tu-harburg.de/fileadmin/BackUsersResources/Hydrology/1D_Theory_Resistance/exercises/S_cript_1D_hydraulic.pdf

Kelly, M; Munson, A; Morales, J; Leeper, D. 2007. Proposed minimum flows and levels for the upper segment of the Braden River, from Linger Lodge to Lorraine Road. Consultado 19 abril 2013. Disponible en http://www.swfwmd.state.fl.us/projects/mfl/reports/braden_mfl_peer_review.pdf

Mora, C.C; Chavarría, B.J. 2008. Factores que afectan la cuenca del Río La Estrella y recomendaciones para la gestión ambiental en su zona costera (Caribe de Costa Rica). International Journal of Tropical Biology, 56(4): 191-203.

NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering). 2013. Sediment transport modeling. Consultado 20 abril 2013. Disponible en <http://www.ncche.olemiss.edu/research/basic/sediment>

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2013. Consultado 20 abril 2013. Disponible en http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/learn_models.html

NWS (National Weather Service). 2007. Evaluation of different hydraulic models in support of national weather service operations: final report. Consultado 19 abril 2013. Disponible en http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcdev/docs/Final_Report_EvaluationHydraulicModels.pdf

Saborío, J. 1996. Evaluación del transporte de sedimentos en el río Pacuare, cuenca tropical húmeda en Costa Rica. Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.

Saleh, F; Ducharne, A; Oudin, L; Flipo, N; Ledoux, E. Hydraulic modeling of flow, water levels and inundations: Serein River case study. Consultado 19 abril 2013. Disponible en http://www.sisypho.upmc.fr/piren/webfm_send/794

Segura, L; Casasola, R. 2012. Modelación hidráulica aplicando Hec-Georas como una herramienta en la gestión del riesgo de inundaciones: caso río La Estrella, Limpon, Costa Rica. XI Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina Perú, del 7-9 de noviembre.

SSG (Scientific Software Group). 2013. TUFLOW Detailed Description. Consultado 20 abril 2013. Disponible en http://www.scisoftware.com/environmental_software/detailed_description.php?products_id=204

Solís, H; Oreamuno, R; Murillo, W. 1993. Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en Centroamérica; casos río Purires y Turrialba. Consultado 23 abril 2013. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A7213E/A7213E.PDF>

Tate, E. 2004. Mapeo de planicies de inundación y modelación de terreno utilizando Hec-Ras y ArcView GIS. Traducido por Sergio Velázquez. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Consultado 19 abril 2013. Disponible en <http://intranet.catie.ac.cr/intranet/posgrado/CUENCAS/Ejercicio%2013%20HECRAS.pdf>

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (2011), TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed **[Data Access Date]** https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/TRMM_3B42_7.html

USACE (US Army Corps of Engineers). 2010. HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. Consultado 20 abril 2013. Disponible en http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf